

OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM PARA OPERAÇÕES EM TORNOS NC UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

Alberto José Álvares

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica, Graco - Grupo de Automação e Controle, 70.910-300, Brasília, email: alvares@AlvaresTech.com

João Carlos Espíndola Ferreira

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Grupo de Integração da Manufatura - Grima, 88040-900, Florianópolis, SC, email: jcf@grucon.ufsc.br

Resumo. *Este trabalho apresenta um novo método de otimização baseado em algoritmos genéticos para otimização dos parâmetros de corte em operações de torneamento multi-passes, onde a minimização da função objetivo, baseada em custo e tempo, é dividida em dois problemas separados de minimização das operações de acabamento e desbaste, a fim de otimizar a profundidade de corte de desbaste e de acabamento, o número de passes de usinagem, a velocidade de corte e o avanço para cada passe individual. Inicialmente é apresentado a formulação do problema, seguido do modelo matemático generalizado de tempos para usinagem multi-passe e da formulação da função objetivo. A seguir é apresentado a função objetivo a ser otimizada e o algoritmo genético proposto para obter o ótimo local. Cabe destacar que o método desenvolvido é parte de um sistema de CAPP em desenvolvimento (<http://WebMachining.AlvaresTech.com>).*

Palavras-chave: *Otimização, Torneamento, Planejamento de Processo, Comando Numérico, Algoritmo Genético.*

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta um novo método de otimização baseado em algoritmos genéticos para otimização dos parâmetros de corte em operações de torneamento multi-passes, onde a minimização da função objetivo, baseada em custo e tempo, é dividida em dois problemas separados de minimização das operações de acabamento e desbaste, a fim de otimizar a profundidade de corte de desbaste e de acabamento. o número de passes de usinagem, a velocidade de corte e o avanço para cada passe individual.

Inicialmente é apresentado a formulação do problema, seguido do modelo matemático generalizado de tempos para usinagem multi-passe e da formulação da função objetivo. A seguir é apresentado a função objetivo a ser otimizada e o algoritmo genético proposto para obter o oimo local. Cabe destacar que o método desenvolvido é parte de um sistema de CAPP em desenvolvimento.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Normalmente um modelo multi-passe é dividido em várias operações de desbaste, com uma mesma profundidade de corte de usinagem ou com diferentes profundidades para cada passe, e um único passe de acabamento. O primeiro passo do problema associado à determinação das condições de corte é o cálculo da profundidade de corte (ap). Se for possível a execução da operação de desbaste em um único passe, então a profundidade de corte é determinada em função do sobremetal de acabamento que deverá ser deixado para o passe de acabamento.

Em operações de desbaste, a profundidade de corte é função da potência da máquina-ferramenta, do comprimento da aresta de corte, da rigidez da peça, do método de fixação, entre outras. Desta forma, podem ser necessários vários passes de usinagem para a remoção do sobremetal, com profundidades de corte menores.

A profundidade de corte está sempre associada à natureza da operação executada. Operações de acabamento e semi-acabamento geralmente são realizadas em um único passe devido ao pequeno sobremetal utilizado.

CHEN e TSAI (1996) relatam várias abordagens para resolver o problema de otimização de usinagem multi-passe, incluindo métodos baseados em programação geométrica, multiplicadores de Lagrange, programação linear, entre outros, que foram utilizados no passado. SHIN e JOO (1992) apresentam um modelo matemático para otimização das condições de corte de operações de torneamento longitudinal com restrições práticas, que influenciou a maioria dos métodos propostos a partir de então, sendo um dos trabalhos mais citados na área. Entretanto este modelo matemático só pode ser aplicado em operações de torneamento longitudinal linear, não contemplando operações de faceamento, torneamento cônico, torneamento circular, entre outras operações, normalmente presentes em peças rotacionais.

CHEN e SU (1998) apresentam um novo modelo matemático que inclui operações de torneamento longitudinal (trajetória da ferramenta retilínea), torneamento cônico, faceamento e torneamento circular, que são considerados simultaneamente no modelo matemático.

Atualmente vários métodos de otimização utilizam abordagens heurísticas baseadas em *simulated annealing*, como descritos em CHEN e TSAI (1996), KHAN et al. (1997) e CHEN e SU (1999), e em algoritmos genéticos,

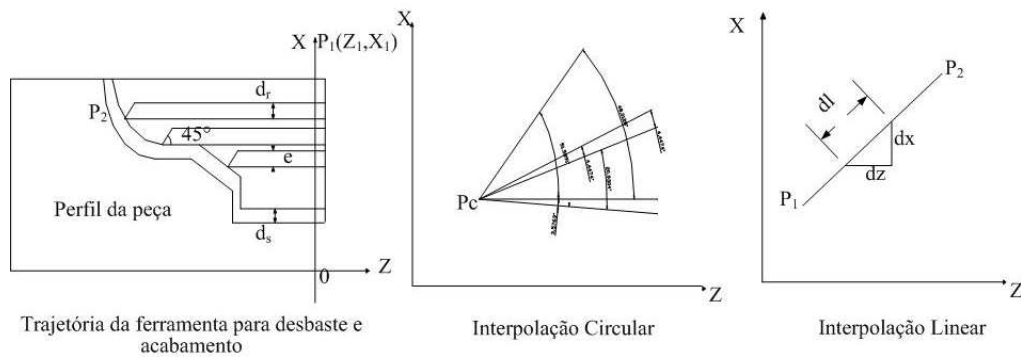


Figura 1: Modelo de usinagem multi-passe: (a) trajetória da ferramenta para dois estágios de desbaste e um passe de acabamento (b) Modelo interpolação circular (c) Modelo interpolação linear.

destacando REDDY et al. (1988), ONWUBOLU e KUMALO (2001), WANG e JAWAHIR (2001), WANG et al. (2002) e CHEN e CHEN (2003).

A maioria dos métodos propostos são voltados quase que exclusivamente para operações de torneamento longitudinal retilíneo e normalmente não estão incluídos em um sistema CAPP, sendo apenas uma proposição de um novo método aplicando um novo algoritmo de otimização.

3. MODELO DE TEMPOS PARA DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CORTE OTIMIZADAS

3.1 Formulação do Problema

A seleção de condições de corte para modelo multi-passe de usinagem envolve a determinação de quatro parâmetros, profundidade, avanço e velocidade de corte, bem como do número de passes de usinagem. Um modelo multi-passe generalizado (TAN e CREESE, 1995 & CHANG et al., 1998) é utilizado para seleção do número de passes de usinagem ótimo, bem como, da velocidade de corte, avanço e profundidade de corte para cada passe individual. A otimização dos parâmetros de usinagem será realizada pela abordagem de algoritmos genéticos, sendo que o modelo matemático de otimização contempla as seguintes operações: torneamento (interno e externo) longitudinal linear (modelo multi-passe); torneamento (interno e externo) longitudinal cônico e longitudinal circular (modelo multi-passe); perfilamento (modelo multi-passe); faceamento (modelo multi-passe); corte da peça (modelo passe único); sangramento (modelo passe único); furação (modelo passe único); rosqueamento (modelo passe único) e recartilhamento (modelo passe único).

3.2 Modelos Matemáticos para Cálculo de Tempos de Usinagem

Peças rotacionais usinadas em um torno CNC apresentam formas contínuas, sendo que os processos de torneamento incluem interpolação linear e/ou interpolação circular (Chen e Su, 1998 e 1999). A interpolação linear pode ser dividida em três operações: torneamento longitudinal retilíneo, faceamento e torneamento cônico. Interpolação circular é usada em torneamento circular, gerando formas circulares, convexas ou côncavas. Para otimização deste perfil contínuo não é possível utilizar os modelos de usinagem propostos apenas para operações de torneamento longitudinal. Assim será utilizado um modelo mais genérico que possa ser aplicado para torneamento externo e interno longitudinal linear, longitudinal cônico e longitudinal circular, bem como, perfilamento e faceamento (CHEN e SU, 1998 e LEE, 1988) em uma única fórmula de cálculo de tempo, englobando todas estas operações.

A figura 1 apresenta a trajetória de ferramenta para operações de desbaste e acabamento (CHEN e SU, 1998). A trajetória da ferramenta para desbaste é constituída por n passes de usinagem, sendo que o desbaste é dividido em dois estágios:

1. desbaste dos primeiros $(n-1)$ th passes tendo uma trajetória de ferramenta para operação de torneamento longitudinal iniciando no ponto P_1 (com profundidade de corte de desbaste d_r , na direção X) até o ponto P_2 , distante d_s do perfil da peça (profundidade de corte de acabamento na direção Z no caso). Depois a ferramenta se afasta do ponto P_2 em direção ao ponto P_3 . O processo continua para o próximo passe de desbaste, conforme a estratégia de movimentação de ferramenta selecionada (Han, 2001);
2. desbaste do último passe de usinagem (n) ao longo do perfil da peça, deixando um sobrematerial de acabamento no valor da profundidade de corte de acabamento (d_s), realizando uma operação de perfilamento de acabamento interno ou externo;

A seguir conclui-se a usinagem com um único passe de acabamento ao longo do perfil da peça, realizando uma operação de perfilamento de acabamento interno ou externo, podendo utilizar a mesma ferramenta de desbaste ou uma específica de acabamento.

3.3 Modelo Matemático Passe Único para Cálculo de Tempos de Usinagem: Faceamento e Torneamento Retilíneo, Cônico e Circular

Têm-se que a taxa de avanço, definida como velocidade de avanço V_f (mm/min), é igual ao produto do avanço f (mm/rev) pela velocidade rotacional N (rev/min) da peça; e a velocidade rotacional N é igual a velocidade de corte V_c (m/min) dividido pelo comprimento da circunferência associado ao diâmetro a usinar D (mm) da peça, logo:

$$V_f = fN \quad (1)$$

$$N = \frac{1000V_c}{\pi D} \quad (2)$$

Para interpolação linear (fig. 1 (c)) entre dois pontos $P_1(Z_1, X_1)$ e $P_2(Z_2, X_2)$ o diâmetro D de um ponto P(z,x) sobre a linha reta que passa por P_1 e P_2 é:

$$D = 2x \quad (3)$$

O tempo infinitesimal dt, para um deslocamento infinitesimal dl de uma ferramenta com uma velocidade de avanço V_f no diâmetro D, é dado pela seguinte forma diferencial:

$$dt = \frac{dl}{V_f} \quad (4)$$

Incorporando as equações (1)-(3) na equação (4) tem-se: $dt = \frac{2\pi x dx}{1000V_c f \sin\theta}$
 θ é $\arctan[(X_2 - X_1)/(Z_2 - Z_1)]$ no intervalo aberto $(0, \pi)$ e $(\pi, 2\pi)$. O tempo de movimento da ferramenta para o deslocamento entre P_1 e P_2 , **torneamento cônico** (fig. 1 (c)), é

$$t = \int_{x_1}^{x_2} \frac{2\pi x dx}{1000V_c f \sin\theta} = \frac{\pi}{1000V_c f} \left| \frac{X_2^2 - X_1^2}{\sin\theta} \right| \quad (5)$$

Se θ não for igual a $0, \pi/2, \pi$, ou $3\pi/2$ o torneamento linear pode ser classificado como um torneamento cônico. No caso de **torneamento retilíneo**, onde θ na equação (5) é 0 ou π , a equação torna-se

$$t = \frac{\pi |x(Z_2 - Z_1)|}{500V_c f} \quad (6)$$

onde $x=X_1=X_2$; e $|Z_2 - Z_1|$ é o comprimento do torneamento longitudinal retilíneo.

No caso de **faceamento**, onde θ na equação (5) é $\pi/2$ ou $3\pi/2$ ($\sin\theta = \pm 1$), o tempo de corte será

$$t = \frac{\pi}{1000V_c f} |X_2^2 - X_1^2| \quad (7)$$

A análise para interpolação circular (figura 1(b)) é análoga ao caso linear, sendo que o tempo infinitesimal é dado por: $dt = \frac{R d\theta}{V_f}$

Usando o centro do arco $P_c(Z_c, X_c)$, a coordenada X do ponto P(z,x) é igual a: $x = X_c + R \sin\theta$

O tempo de movimento da ferramenta para **torneamento circular**, tempo de corte, entre $P_1(Z_1, X_1)$ e $P_2(Z_2, X_2)$ é

$$t = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{2\pi R}{1000V_c f} (X_c + R \sin\theta) d\theta = \frac{2\pi R}{1000V_c f} |X_c(\theta_2 - \theta_1) - R(\cos\theta_2 - \cos\theta_1)| \quad (8)$$

onde θ_1 é $\arctan((X_1 - X_c)/(Z_1 - Z_c))$ e θ_2 é $\arctan((X_2 - X_c)/(Z_2 - Z_c))$, no intervalo fechado $[0, 2\pi]$.

3.4 Modelo Matemático Multi-passe para Tempo de Corte de Perfil Contínuo

Neste caso utiliza-se a abordagem multi-corte onde o desbaste é dividido em dois estágios com n passes de usinagem e o acabamento em um único passe, conforme descrito anteriormente (figura 1). No caso mais genérico que se possa conceber, as seguintes operações de usinagem serão necessárias para remoção das features de usinagem¹:

- **Primeiro estágio de desbaste:** (n-1) passes associados às operações de torneamento retilíneo ou faceamento, deixando um sobremetal para o segundo estágio de desbaste, que executará o passe n. A trajetória de corte é linear onde a profundidade de corte para cada linha, pode ser calculada para cada linha L_g por $x - (x_I - \sum_{g=1}^{n-1} dr_g) = 0$, onde $P_I(Z_I, X_I)$ é o ponto inicial (figura 1); dr_g é a profundidade de corte para cada passe, onde $g=1, 2, \dots, n-1$. Os pontos de intersecção $P_{N(g)}(Z_{N(g)}, X_{N(g)})$ de cada linha L_g com o perfil da peça mais o sobremetal de acabamento ds é calculado para cinco casos:

1. segmento cônico (9) entre $P_{1t}(Z_{1t}, X_{1t})$ e $P_{2t}(Z_{2t}, X_{2t})$;

$$X_{N(g)} = X_I - \sum_{i=1}^g dr_g ; Z_{N(g)} = Z_{1t} + \frac{Z_{2t} - Z_{1t}}{X_{2t} - X_{1t}} \left[(d_t - \sum_{i=1}^g dr_g) - X_{1t} \right] \quad (9)$$

2. face de um segmento (10) entre $P_{1f}(Z_{1f}, X_{1f})$ e $P_{2f}(Z_{2f}, X_{2f})$;

$$X_{N(g)} = X_I - \sum_{i=1}^g dr_g ; Z_{N(g)} = Z_{1v} \text{ ou } Z_{N(g)} = Z_{2v} (Z_{1v} = Z_{2v}) \quad (10)$$

¹As features de usinagem são obtidas através da conversão ou mapeamento das features de projeto para o domínio da usinagem.

3. arco de circunferência convexo (11) entre $P_{1c}(Z_{1c}, X_{1c})$ e $P_{2c}(Z_{2c}, X_{2c})$, sendo $P_c(Z_c, X_c)$ o centro e r_a o raio arco de circunferência;

$$X_{N(g)} = X_I - \sum_{i=1}^g dr_g ; Z_{N(g)} = Z_c + \sqrt{r_a^2 - \left[(d_t - \sum_{i=1}^g dr_g) - X_c^2 \right]^2} \quad (11)$$

4. arco de circunferência côncavo (12) entre $P_{1c}(Z_{1c}, X_{1c})$ e $P_{2c}(Z_{2c}, X_{2c})$, sendo $P_c(Z_c, X_c)$ o centro e r_a o raio arco de circunferência;

$$X_{N(g)} = X_I - \sum_{i=1}^g dr_g ; Z_{N(g)} = Z_c - \sqrt{r_a^2 - \left[(d_t - \sum_{i=1}^g dr_g) - X_c^2 \right]^2} \quad (12)$$

5. entre dois pontos de intersecção do próprio perfil da peça (13), ou seja ponto crítico, onde uma feature de projeto (forma) muda para a outra (CAM-I, 1986):

$$X_{N(g)} = X_{\text{ponto crítico}} ; Z_{N(g)} = Z_{\text{ponto crítico}} \quad (13)$$

A seguir calcula-se o comprimento de corte para cada passe relativo ao torneamento retilíneo, $H_{(g)}$, no primeiro estágio de desbaste, onde Z_I é a coordenada Z do ponto inicial $P_I(Z_I, X_I)$ e d_s a profundidade de corte de acabamento:

$$H_{(g)} = |Z_{N(g)} - Z_I| - d_s \quad (14)$$

Logo o tempo de corte para cada passe pode ser calculado através das equações (6) e (14), resultando em

$$T_{hr(g)} = \frac{\pi |X_{(g)} H_{(g)}|}{500 V_{cr} f_r} \quad (15)$$

Sendo $H_{(g)} = |Z_{N(g)} - Z_I| - d_s$; $X_{(g)} = X_{N(g)} = X_I - \sum_{i=1}^g dr_g$, V_{cr} e f_r a velocidade de corte e avanço para desbaste. O tempo de corte total para o primeiro estágio de desbaste S_{r1} será

$$S_{r1} = \sum_{g=1}^{n-1} T_{hr(g)} \quad (16)$$

- **Segundo estágio de desbaste:** passe n (último passe de desbaste) onde será executado o perfilamento/cópia de desbaste constituído por uma sequência continua de operações de torneamento retilíneo, torneamento cônico, torneamento circular ou faceamento, deixando um sobremetal d_s para o passe de acabamento. Assim o perfil 2D interno e/ou externo da peça (poliforma²) é constituído por um conjunto de arcos de circunferência e de segmentos de retas paralelas, perpendiculares e oblíquas ao eixo rotacional da peça. Deve-se calcular o tempo de corte para cada conjunto de torneamento de segmento retilíneo tendo $P_{1(i)}(Z_{1(i)}, X_{1(i)})$ e $P_{2(i)}(Z_{2(i)}, X_{2(i)})$, os pontos inicial e final no perfil, logo para o n th passe de desbaste do i th torneamento de segmento retilíneo, tem:

$$T_{hr(i)(n)} = \frac{\pi |X_{(i)(n)} (Z_{2(i)} - Z_{1(i)})|}{500 V_{cr} f_r} ; X_{(i)(n)} = \frac{D_{(i)}}{2} + d_s$$

$$T_{hr(i)(n)} = \frac{\pi \left| \left(\frac{D_{(i)}}{2} + d_s \right) (Z_{2(i)} - Z_{1(i)}) \right|}{500 V_{cr} f_r} \quad (17)$$

O tempo total de corte para o *passe de desbaste de segmentos retilíneos* $S_{hr(n)}$ onde n_h é o número de segmentos retilíneos, será

$$S_{hr(n)} = \sum_{i=1}^{n_h} T_{hr(i)(n)} \quad (18)$$

Para *torneamento cônico* do j th cone entre dois pontos $P_{1(j)}(Z_{1(j)}, X_{1(j)})$ e $P_{2(j)}(Z_{2(j)}, X_{2(j)})$, as coordenadas de $P_{1(j)(n)}$ e $P_{2(j)(n)}$ e os diâmetros respectivos da peça acabada $D_{1(j)}$ e $D_{2(j)}$, para o n th passe de desbaste é

$$x_{1(j)(n)} = \frac{D_{1(j)}}{2} + d_s ; x_{2(j)(n)} = \frac{D_{2(j)}}{2} + d_s \quad (19)$$

$$T_{tr(j)(n)} = \frac{\pi}{1000 V_{cr} f_r} \frac{\left| \frac{1}{4} (D_{2(j)}^2 - D_{1(j)}^2) + (D_{2(j)} - D_{1(j)}) d_s \right|}{\sin \theta_{(j)}} \quad (20)$$

onde $\theta_{(j)} = \arctan \left(\frac{X_{2(j)} - X_{1(j)}}{Z_{2(j)} - Z_{1(j)}} \right) = \arctan \left(\frac{D_{2(j)} - D_{1(j)}}{2(Z_{2(j)} - Z_{1(j)})} \right)$; $0 < \theta_{(j)} < \pi$; $\pi < \theta_{(j)} < 2\pi$

²Poliforma é uma forma geométrica fechada formada por uma sucessão de linhas e arcos conectados, que descrevem em 2D, a área final da peça rotacional e a área global de material a ser removido do *blank* (peça bruta). Na realidade a área (2D) está relacionada ao volume do sólido rotacional e ao volume global de material a ser removido do *blank*.

O tempo total de corte para o *passe de desbaste de segmentos cônicos* $S_{tr(n)}$ onde n_t é o número de segmentos cônicos, será

$$S_{tr(n)} = \sum_{j=1}^{n_t} T_{hr(j)(n)} \quad (21)$$

O tempo de corte para n th *passe de desbaste para todos os segmentos de faceamento* $S_{vr(n)}$ pode ser obtido da equação (20) fazendo $\text{sen}\theta = \pm 1$ e n_v é o número de segmentos de faceamento:

$$S_{vr(n)} = \sum_{k=1}^{n_v} \frac{\pi}{1000V_{cr}f_r} \left| \frac{1}{4} (D_{2(k)}^2 - D_{1(k)}^2) + (D_{2(k)} - D_{1(k)})d_s \right| \quad (22)$$

Para o l th arco de circunferência entre dois pontos $P_{1(l)}(Z_{1(l)}, X_{1(l)})$ e $P_{2(l)}(Z_{2(l)}, X_{2(l)})$, raio do arco $r_{a(l)(n)}$ do n th *passe de desbaste* será

$$r_{a(l)(n)} = R_{(l)} + d_s \quad (23)$$

onde $R_{(l)}$ é o raio da peça acabada para o l th arco de circunferência. Trocando R na equação (8) por $r_{a(l)(n)}$ (23), o tempo de corte do n th *passe de desbaste para o lth arco de circunferência* $T_{cr(l)(n)}$ será

$$T_{cr(l)(n)} = \frac{\pi(R_{(l)} + d_s)}{500V_{cr}f_r} \left| X_{c(l)}(\theta_{2(l)} - \theta_{1(l)}) - (R_{(l)} + d_s)(\cos\theta_{2(l)} - \cos\theta_{1(l)}) \right| \quad (24)$$

onde

$$\theta_{1(l)} = \arctan \left(\frac{X_{1(l)} - X_{c(l)}}{Z_{1(l)} - Z_{c(l)}} \right) = \arctan \left(\frac{\frac{D_{1(l)}}{2} - X_{c(l)}}{Z_{1(l)} - Z_{c(l)}} \right) \quad (25)$$

$$\theta_{2(l)} = \arctan \left(\frac{X_{2(l)} - X_{c(l)}}{Z_{2(l)} - Z_{c(l)}} \right) = \arctan \left(\frac{\frac{D_{2(l)}}{2} - X_{c(l)}}{Z_{2(l)} - Z_{c(l)}} \right) \quad (26)$$

$D_{1(l)}$ e $D_{2(l)}$ são os diâmetros da peça acabada para o l th arco de circunferência nos pontos $P_{1(l)}$ e $P_{2(l)}$, respectivamente; e $P_{c(l)}(Z_{c(l)}, X_{c(l)})$ é o centro do l th arco de circunferência. O tempo de corte para o segundo estágio de desbaste, último *passe de desbaste, para todos os arcos de circunferência* será

$$S_{cr(n)} = \sum_{l=1}^{n_c} T_{cr(l)(n)} \quad (27)$$

onde n_c é o número de arcos circulares na peça usinada. O tempo total de corte para o segundo estágio de desbaste S_{r2} será dado pela soma de cada parcela das operações de desbaste de perfilamento

$$S_{r2} = S_{hr(n)} + S_{tr(n)} + S_{vr(n)} + S_{cr(n)} \quad (28)$$

- **Acabamento:** *passe de acabamento com profundidade de corte “ds”, onde será executado o perfilamento/cópia de acabamento constituído por uma seqüência continua de operações de torneamento retilíneo, torneamento cônico, torneamento circular ou faceamento. O cálculo é semelhante ao segundo estágio das operações de desbaste, sendo dividido em quatro tipos de operações já tratadas. O tempo de corte para o passe de acabamento para cada conjunto de torneamento de segmento retilíneo, onde $P_{1(i)}(Z_{1(i)}, X_{1(i)})$ e $P_{2(i)}(Z_{2(i)}, X_{2(i)})$, são os pontos inicial e final no perfil.*

Assim o passe de acabamento para torneamento de segmento retilíneo será

$$T_{hr(i)(n)} = \frac{\pi \left| \left(\frac{D_{(i)}}{2} + d_s \right) (Z_{2(i)} - Z_{1(i)}) \right|}{500V_{cr}f_r} \quad (29)$$

O tempo total de corte para o *passe de acabamento de segmentos retilíneos* S_{hs} onde n_h é o número de segmentos retilíneos, será

$$S_{hs} = \sum_{i=1}^{n_h} T_{hs(i)} \quad (30)$$

Para torneamento cônico do j th cone entre dois pontos $P_{1(j)}(Z_{1(j)}, X_{1(j)})$ e $P_{2(j)}(Z_{2(j)}, X_{2(j)})$, as coordenadas de $P_{1(j)(n)}$ e $P_{2(j)(n)}$ e os diâmetros respectivos da peça acabada $D_{1(j)}$ e $D_{2(j)}$, para o *passe de acabamento* é

$$T_{ts(j)} = \frac{\pi}{1000V_{cs}f_s} \left| \frac{(D_{2(j)}^2 - D_{1(j)}^2)}{4\text{sen}\theta_{(j)}} \right| \quad (31)$$

onde $\theta_{(j)} = \arctan \left(\frac{X_{2(j)} - X_{1(j)}}{Z_{2(j)} - Z_{1(j)}} \right) = \arctan \left(\frac{D_{2(j)} - D_{1(j)}}{2(Z_{2(j)} - Z_{1(j)})} \right)$; $0 < \theta_{(j)} < \pi$; $\pi < \theta_{(j)} < 2\pi$

O tempo total de corte para o *passe de acabamento de segmentos cônicos* $S_{tr(n)}$ onde n_t é o número de segmentos cônicos, será

$$S_{ts} = \sum_{j=1}^{n_t} T_{ts(j)} \quad (32)$$

O tempo de corte para o passe de acabamento para todos os segmentos de faceamento S_{vs} pode ser obtido da equação (31) fazendo $\sin\theta = \pm 1$ e n_v é o número de segmentos de faceamento:

$$S_{vs} = \sum_{k=1}^{n_v} \frac{\pi}{1000V_{cs}f_s} \left| \frac{1}{4} (D_{2(k)}^2 - D_{1(k)}^2) \right| \quad (33)$$

Para o l th arco de circunferência entre dois pontos $P_{1(l)}(Z_{1(l)}, X_{1(l)})$ e $P_{2(l)}(Z_{2(l)}, X_{2(l)})$, raio do arco $r_{a(l)}$ do passe de acabamento será

$$r_{a(l)} = R_{(l)} \quad (34)$$

onde $R_{(l)}$ é o raio da peça acabada para o l th arco de circunferência. Trocando $r_{a(l)}$ na equação (8) por $R_{(l)}$ (34), o tempo de corte para o passe de acabamento para o l th arco de circunferência $T_{cs(l)}$ será

$$T_{cs(l)} = \frac{\pi R_{(l)}}{500V_{cs}f_s} \left| X_{c(l)}(\theta_{2(l)} - \theta_{1(l)}) - R_{(l)}(\cos\theta_{2(l)} - \cos\theta_{1(l)}) \right| \quad (35)$$

onde $\theta_{1(l)}$ e $\theta_{2(l)}$ são definidos por (25) e (26), respectivamente.

$D_{1(j)}$ e $D_{2(j)}$ são os diâmetros da peça acabada para o l th arco de circunferência nos pontos $P_{1(l)}$ e $P_{2(l)}$, respectivamente; e $P_{c(l)}(Z_{c(l)}, X_{c(l)})$ é o centro do l th arco de circunferência. O tempo de corte para o passe de acabamento para todos os arcos de circunferência será

$$S_{cs} = \sum_{l=1}^{n_c} T_{cs(l)} \quad (36)$$

onde n_c é o número de arcos circulares na peça usinada.

O tempo total de corte para o passe de acabamento S_f será dado pela soma de cada parcela das operações de acabamento de perfilamento

$$S_f = S_{hs} + S_{ts} + S_{vs} + S_{cs} \quad (37)$$

3.5 Modelo Matemático Multi-passe para Tempo de Corte de Torneamento Longitudinal Retilíneo

O modelo multi-passe utilizado para cálculo de tempos é semelhante ao modelo adotado para torneamento retilíneo de desbaste no primeiro estágio, sendo constituído por uma operação multi-passe de desbaste, formada por n passes de desbaste, e por um único passe de acabamento. O modelo de tempos para as operações de desbaste e acabamento é apresentado a seguir.

- **Desbaste:** calcule o comprimento de corte para cada passe relativo ao torneamento retilíneo, $H_{(g)}$ onde Z_1 é a coordenada Z do ponto inicial $P_I(Z_1, X_1)$; $P_{N(g)}(Z_{N(g)}, X_{N(g)})$ é o ponto crítico de intersecção de cada linha associada ao passe de usinagem; e d_s a profundidade de corte de acabamento:

$$H_{(g)} = |Z_{N(g)} - Z_I| - d_s \quad (38)$$

Logo o tempo de corte para cada passe pode ser calculado através das equações (6) e (38), resultando em

$$T_{hr(g)(m)} = \sum_{m=1}^{n_r} \left(\frac{\pi |X_{(g)(m)} H_{(g)(m)}|}{500V_{cr}f_r} \right) \quad (39)$$

Sendo $H_{(g)} = |Z_{N(g)} - Z_I| - d_s$; $X_{(g)} = X_{N(g)} = X_I - \sum_{g=1}^n dr_g$, V_{cr} e f_r a velocidade de corte e avanço para desbaste longitudinal, respectivamente, e n_r o número de features presentes na peça e que serão usinadas por este procedimento. O tempo de corte total para os n passes de desbaste longitudinal S_{rr} será

$$S_{rr} = \sum_{g=1}^n T_{hr(g)(m)} \quad (40)$$

- **Acabamento:** calcula-se o único passe de acabamento após a conclusão do n th passe de desbaste, onde o tempo de usinagem será dado por

$$T_{hs} = \frac{\pi |D_{(i)}(Z_{2(i)} - Z_{1(i)})|}{500V_s f_s} \quad (41)$$

Onde $D_{(i)}$ é diâmetro externo de uma features de forma de diâmetro externo (OD). O tempo total de corte para o passe de torneamento longitudinal é S_{hs} , sendo n_r o número de segmentos retilíneos (features) presentes na peça:

$$S_{hs} = \sum_{m=1}^{n_r} T_{hs(m)} \quad (42)$$

3.6 Modelo Matemático Multi-passe para Tempo de Corte de Sangramento, Corte de Peças e Faceamento

O modelo multi-passe utilizado para cálculo de tempos é semelhante ao modelo adotado para faceamento, no segundo estágio de desbaste. Assim o modelo de sangramento será constituído por dois passes (desbaste e acabamento), sendo igual ao modelo para faceamento. Já o modelo de corte de peças é constituído apenas pelo modelo de desbaste, associado ao corte da peça. O modelo de tempo para os dois passes é apresentado a seguir:

- **Desbaste:** O tempo de corte para o passe de desbaste para todos os sangramentos S_{gr} pode ser obtido da equação (20) fazendo $\text{sen}\theta = \pm 1$ e n_{gr} é o número de operações de sangramento:

$$S_{gr} = \sum_{k=1}^{n_g} \frac{\pi}{1000V_{cr}f_r} \left| \frac{1}{4} (D_{2(k)}^2 - D_{1(k)}^2) + (D_{2(k)} - D_{1(k)})d_s \right| \quad (43)$$

- **Acabamento:** O tempo de corte para o passe de acabamento para todos os sangramentos S_{gs} pode ser obtido da equação (31) fazendo $\text{sen}\theta = \pm 1$ e n_{gr} é o número de operações de sangramento de acabamento:

$$S_{gs} = \sum_{k=1}^{n_g} \frac{\pi}{1000V_{cs}f_s} \left| \frac{1}{4} (D_{2(k)}^2 - D_{1(k)}^2) \right| \quad (44)$$

3.7 Modelo Matemático Passe Único para Tempo de Corte de Recartilhamento

O modelo de tempos é semelhante ao faceamento podendo ser calculado da mesma forma com um único passe: o tempo de corte para o passe de todos os recartilhados S_{ks} pode ser obtido da equação (31) fazendo $\text{sen}\theta = \pm 1$ e n_k é o número de operações de recartilhamento:

$$S_k = \sum_{k=1}^{n_k} \frac{\pi}{1000V_{cs}f_s} \left| \frac{1}{4} (D_{2(k)}^2 - D_{1(k)}^2) \right| \quad (45)$$

3.8 Modelo Matemático Passe Único para Tempo de Corte de Furação e Alargamento

O tempo de corte de furação é dado por:

$$T_d = \frac{\pi D_t L_w}{1000V_c f} \quad (46)$$

$l_w = |(Z_2 - Z_1)|$ = comprimento da superfície a ser usinada na direção longitudinal

f = avanço (mm/revolução)

D_t = Diâmetro da ferramenta (mm)

V_c = Velocidade de Corte (m/min)

O tempo total de corte para furação é S_d , sendo n_d o número de furos na peça:

$$S_d = \sum_{i=1}^{n_d} T_{d(i)} \quad (47)$$

3.9 Modelo Matemático Passe Único para Tempo de Corte de Roscamento Cilíndrico

O modelo de corte é semelhante ao torneamento retílinio para o passe de acabamento, podendo ser calculado para um único passe pelo modelo abaixo:

$$T_{th(i)} = \frac{\pi |D(i)(Z_{2(i)} - Z_{1(i)})|}{500V_s f_s}$$

Onde $D(i)$ é diâmetro externo da rosca. O tempo total de corte para o passe de roscamento é S_{th} , sendo n_{th} o número de segmentos retilíneos com roscas:

$$S_{th} = \sum_{i=1}^{n_{th}} T_{th(i)} \quad (48)$$

4. MODELOS PROPOSTOS PARA OTIMIZAÇÃO DE OPERAÇÕES DE USINAGEM EM TORNOS CNC

4.1 Baseado no Mínimo Custo

A unidade de custo de produção é utilizada como critério de medida de otimização das condições de usinagem sendo utilizado o modelo apresentado por CHEN e SU (1998). São consideradas muitas restrições práticas, incluindo limites máximos e mínimos para as condições de usinagem, restrições de força de corte e potência da máquina, restrição de acabamento superficial, entre outras.

A função objetivo a ser otimizada leva em consideração o critério econômico associado ao mínimo custo de produção unitário, que inclui: o custo associado ao tempo real de usinagem da peça; o custo de máquina parada relativo às operações de carga e descarga da máquina e movimentação da ferramenta em vazio; custo de troca de ferramenta; e custo da ferramenta.

O custo de usinagem C_m (\$/peça) é dado por $C_m = k_o T_M$

onde k_o é a soma do custo direto e encargos sobre o trabalho de usinagem e T_M é o tempo de corte total calculado pelo somatório dos tempos de usinagem para os passes de usinagem (desbaste e acabamento) das operações necessárias para usinagem das features e que foram calculadas na seção anterior, sendo

$$T_M = S_{r1} + S_{r2} + S_f + S_{hr} + S_{hs} + S_{gr} + S_{gs} + S_k + S_d + S_{th} \quad (49)$$

O custo de máquina parada (improdutiva) é C_I (\$/peça) sendo calculado por

$$C_I = K_o T_I \quad (50)$$

onde T_I é o tempo de máquina parada, ou seja sem remoção de cavaco. Este custo é dividido em um termo constante (t_c) relativo ao tempo de carga e descarga da máquina e um termo variável (t_v) associado à movimentação da ferramenta em vazio, sem remoção de material. O tempo de movimentação da ferramenta sem remoção de material (t_v) pode ser representado como a distância transversal l_a (mm) dividido pela velocidade de avanço rápido da máquina V_{fa} (mm/min), assim: $t_v = \frac{l_a}{V_{fa}}$

A distância transversal rápida pode ser calculada para as operações de torneamento retilíneo, cônico, circular, faceamento e perfilamento para os passes associados ao primeiro e segundo estágio de desbaste e para o passe de acabamento (figura 1), sendo o somatório dos passes de usinagem igual a (n-1) no primeiro estágio de desbaste, mais um passe de desbaste no segundo estágio e um passe de acabamento, sendo, neste caso:

$$l_a = \sum_{g=1}^{n-1} H_g + \sqrt{2}(n-1)e + 2\overline{P_I P_M} + 2\overline{P_I P_L} - 2d_s \quad (51)$$

onde P_I é o ponto inicial, P_M é o ponto final e P_L é ponto de menor corte (menor diâmetro usinado na peça).

Deve-se agora incluir os outros movimentos de ferramenta no vazio para as demais operações de usinagem presentes na peça, que nada mais será do que um caso particular do caso mais genérico de l_a .

Para torneamento longitudinal a equação é a mesma. Para faceamento, recartilhamento, corte da peça e sangramento, os termos H_g e e são zero, devendo-se calcular os segmentos associados ao posicionamento $\overline{P_I P_M}$ e ao corte $\overline{P_I P_L}$ para operações de desbaste e acabamento, sendo o novo l_{af} dado por

$$l_{af} = 2\overline{P_I P_M} + 2\overline{P_I P_L} - 2d_s \quad (52)$$

Para furação o termo d_s é nulo, pois não há operação de acabamento. Este cálculo assume a utilização da mesma ferramenta para operações de desbaste e acabamento. No caso de haver uma troca de ferramenta para operações de acabamento, deve-se incluir o cálculo do deslocamento associado à movimentação até o plano de aproximação e de troca de ferramenta, por exemplo.

Assim o tempo de máquina parada T_I pode ser calculado incluindo o somatório de todas as contribuições de movimentação de ferramenta, associada a todas as operações de usinagem realizada na peça para remoção de todas as features de usinagem (n_{fu}) determinadas.

$$T_I = t_c + t_v = t_c + \frac{l_a}{V_{fa}} \quad (53)$$

O custo de máquina parada (improdutiva) será

$$C_I = k_o T_I = k_o \left\{ \sum_{j=1}^{n_{fu}} \left[t_c + \frac{\sum_{g=1}^{n-1} H_g + \sqrt{2}(n-1)e + 2\overline{P_I P_M} + 2\overline{P_I P_L} - 2d_s}{V_{fa}} \right] \right\} \quad (54)$$

O custo de troca de ferramenta C_R (\$/peça) é calculado por

$$C_R = k_o T_R \quad (55)$$

onde T_R é o tempo de troca de ferramenta (min). O tempo de troca de ferramenta pode ser escrito em termos da vida da ferramenta t_l (min), do tempo requerido para trocar a ferramenta t_e (min) e o tempo de corte T_M , sendo:

$$T_R = t_e \frac{T_M}{t_l}$$

onde $(\frac{T_M}{t_l})^{-1}$ representa o número de peças que podem ser produzidas antes que a ferramenta seja trocada.

A equação de vida da ferramenta é dado pela fórmula de Taylor expandida: $t = \frac{C_0}{V_s^\alpha f_s^\beta a_p^\gamma}$

onde α, β, γ e C_0 são as constantes da fórmula de Taylor para uma determinada ferramenta de corte usar um determinado material, par peça-ferramenta. Pode-se utilizar a mesma ferramenta de corte para os passes de desbaste e acabamento ou ferramentas diferentes, necessitando assim de modelos específicos de vida de ferramenta para cada caso, a fim de se evitar erros grosseiros na definição dos modelos, pois o desgaste de ferramenta é diferente para operações de desbaste e acabamento.

Quando se utiliza a mesma ferramenta para operações de desbaste e acabamento a vida da ferramenta t_l deve ser calculada segundo SHIN e JOO (1992) por uma composição balanceada da taxa de desgaste para desbaste e acabamento, dado por: $t_l = w t_r + (1 - w) t_s$. Onde $t_r = \frac{C_0}{V_r^\alpha f_r^\beta a_{pr}^\gamma}$ representa a vida para desbaste e $t_s = \frac{C_0}{V_s^\alpha f_s^\beta a_{ps}^\gamma}$ representa a vida para acabamento; w é um peso da equação de vida variando no intervalo aberto (0,1), sendo definido de maneira empírica.

O custo de troca de ferramenta C_R para cada ferramenta pode ser expresso por

$$C_R = k_o T_R = k_o t_e \frac{T_M}{t_l} \quad (56)$$

O custo da ferramenta C_T (\$/peça) é calculado por

$$C_T = k_t \frac{T_M}{t_l} \quad (57)$$

onde k_t é o custo por gume (aresta de corte) da ferramenta (\$/gume).

O custo total de produção por unidade produzida UC (\$/peça) é: $UC = C_M + C_l + C_R + C_T$

$$UC = \sum_{t=1}^{n_{tool}} \left[k_{o(n_{tool})} T_M + k_{o(n_{tool})} T_I + k_{o(n_{tool})} \left(t_e \frac{T_M}{t_l} \right) + k_{t(n_{tool})} \left(\frac{T_M}{t_l} \right) \right] \quad (58)$$

n_{tool} é o número total de ferramentas utilizadas na fabricação da peça. Assim o custo deve ser calculado para cada ferramenta utilizada, sendo esta a função objetivo a ser otimizada para o menor custo de produção.

4.2 Baseado na Máxima Taxa de Produção

O menor tempo total de produção da peça é utilizada como critério de medida de otimização das condições de usinagem sendo utilizado o modelo apresentado por BAYKASOGLU e DERELI (2002). São também consideradas as mesmas restrições práticas aplicadas ao modelo de custo, durante o processo de otimização da função objetivo.

A função objetivo a ser otimizada leva em consideração o critério econômico associado ao mínimo tempo de produção unitário, utilizando o modelo de tempo apresentado anteriormente, que inclui: tempo real de usinagem da peça (T_M); tempo máquina parada (improdutivo) relativo às operações de carga e descarga da máquina, setup e movimentação da ferramenta em vazio (T_I); e tempo troca de ferramenta ($T_T = t_e \frac{T_M}{t_l}$).

O tempo total de produção por unidade produzida UT (min) é

$$UT = T_M + T_I + \left(t_e \frac{T_M}{t_l} \right) \quad (59)$$

Sendo esta a função objetivo a ser otimizada para o menor tempo de produção.

4.3 Restrições Práticas de Usinagem

Restrições práticas são impostas durante as operações de desbaste e acabamento. As restrições das condições de usinagem referem-se as faixas de utilização (valores mínimo e máximo) da velocidade de corte, avanço e profundidade de corte disponíveis na base de dados de ferramentas, associados ao par material da peça-ferramenta. Deve-se levar em conta as limitações de rotação e avanço da máquina-ferramenta escolhida, também disponível na base de dados. A seguir são apresentadas as restrições utilizadas na otimização das condições de usinagem para os dois critérios de otimização utilizados.

4.3.1 Principais Restrições Associadas às Operações de Desbaste e Acabamento³

- Restrição na velocidade de corte: $V_{rL} \leq V_r \leq V_{rU}$; $V_{sL} \leq V_s \leq V_{sU}$
- Restrição no avanço: $f_{rL} \leq f_r \leq f_{rU}$; $f_{sL} \leq f_s \leq f_{sU}$
- Restrição na profundidade de corte: $a_{p_{rL}} \leq a_{p_r} \leq a_{p_{rU}}$; $a_{p_{sL}} \leq a_{p_s} \leq a_{p_{sU}}$
- Restrição na vida da ferramenta: $T_L \leq t_r \leq T_U$; $T_L \leq t_s \leq T_U$
- Restrição na força de corte: $F_r = k_f f_r^\mu a_{p_r}^\nu \leq F_U$; $F_s = k_f f_s^\mu a_{p_s}^\nu \leq F_U$, onde F_r e F_s é a força de usinagem durante o desbaste (kgf); k_f , μ e ν são as constantes da equação de Kienzle para o par peça/ferramenta, e F_U é a máxima força de usinagem disponível (kgf).
- Restrição força de corte calculada em uma viga engastada e carregada a uma distância L: $F_r = \frac{3EIR\delta}{L^3} \leq F_U$, onde E é o módulo de elasticidade do material, I é o momento de inércia, R é o raio da peça, L é o comprimento da peça e δ é a deflexão da peça no ponto de aplicação da força.
- Restrição na potência de corte: $P_r = \frac{k_f f_r^\mu a_{p_r}^\nu V_r}{6120\eta} \leq P_U$; $P_s = \frac{k_s f_s^\mu a_{p_s}^\nu V_s}{6120\eta} \leq P_U$, onde P_r e P_s é a potência de corte durante a usinagem (kW), η é o fator de eficiência associado a potência da máquina e P_U é a potência máxima disponível para corte (KW).
- Restrição associada a região de corte estável (NARANG e FISCHER, 1993): $V_r^\lambda f_r a_{p_r}^\nu \geq S_L$ e $V_s^\lambda f_s a_{p_s}^\nu \geq S_L$ onde λ e ν são constante associadas ao par peça/ferramenta e S_L é o limite da região de corte estável.

³Os sufixos $_{rL}$ e $_{rU}$ referem-se aos limites inferior e superior para cada restrição considerada nas operações de desbaste, já os sufixos $_{sL}$ e $_{sU}$ referem-se aos limites inferior e superior para cada restrição considerada nas operações de acabamento.

- Restrição acabamento superficial:

$$f_s \leq \sqrt{8r_\epsilon Rt} ; f_s \leq \sqrt{31r_\epsilon Ra} \quad (60)$$

ou, pois $\frac{Ra}{Rt} = 0,256$, onde r_ϵ é raio arredondamento da ponta da ferramenta, Ra é profundidade de rugosidade e Rt é desvio médio aritmético de rugosidade; sendo Rt um parâmetro mais confiável na medição da rugosidade.

$$f_{sU} \leq 0,8 \left[\frac{8Ra10^{-3}}{2 \star 0,256} \right]^{0,5} \quad (61)$$

Para $Ra \leq 3,2\mu m$ ou

$$f_{sU} \leq 0,8 \left[\frac{8 \star 1,6 \star Ra10^{-3}}{0,256} \right]^{0,5} \quad (62)$$

Para $Ra > 3,2\mu m$

- Restrição da profundidade de corte como função da dureza Brinell (BNH) do material e da rugosidade superficial Ra : $a_{psU} \leq \frac{32Ra}{BNH^{0,8}}$

4.3.2 Restrições Miscelâneas

- Relacionamentos entre os parâmetros de desbaste e acabamento, segundo CHANG et al. (1998), são apresentados a seguir:

$$V_s > k_1 V_r ; f_r > k_2 f_s ; a_{pr} > k_3 a_{ps}$$

onde k_1, k_2, k_3 são coeficientes de relacionamento e $k_1, k_2, k_3 \geq 1$

- Restrição profundidade de corte total levando em conta a ocorrência de operações de desbaste e acabamento: a profundidade de corte de acabamento (a_{ps}) deve ser igual a máxima profundidade de corte a ser removida da peça bruta (a_p) menos o somatório da profundidade de corte para cada passe de desbaste. Os passes de desbaste podem ter a mesma profundidade de corte ou profundidades de cortes diferentes. Quando tiverem a mesma profundidade de corte a profundidade total será dada por $n \star a_{pr}$. Quando as profundidades de corte forem diferentes, o somatório das profundidades de corte a ser removida nos n passes de desbaste será $\sum_{i=1}^n a_{pr(i)}$. Logo

$$a_{ps} = a_p - \sum_{i=1}^n a_{pr(i)} \text{ ou } a_{ps} = a_p - n \star a_{pr} \quad (63)$$

Os limites para o número de passes de desbaste é dado por $N_L \leq n \leq N_U$

onde os limites superior e inferior do número de passes são

$$N_L = \frac{a_p - a_{ps}}{a_{prU}} , N_U = \frac{a_p - a_{ps}}{a_{prL}} \quad (64)$$

No caso do modelo trabalhar com a mesma profundidade de corte para os passes de desbaste, tem-se para cada possível profundidade de corte de acabamento (a_{ps}) uma correspondente profundidade de corte para desbaste, que pode ser calculado

$$a_{pr} = \frac{a_p - a_{ps}}{n} \quad (65)$$

Para o caso de passes de desbaste com profundidades diferentes, tem-se que o número tentativa de passes de desbaste ($n_{(i)}$) é calculado baseado na máxima profundidade de corte permitida para operações de desbaste (limite superior, a_{prU}) e na profundidade de corte para o passe de acabamento, que varia entre os limites superior e inferior da operação de acabamento, sendo:

$$n_{(i)} = \frac{a_p - a_{ps(i)}}{a_{prU}} \quad (66)$$

Desta forma teremos duas abordagens com profundidade de corte de desbaste fixo ou variável, aumentando a complexidade do modelo.

5. METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO

O procedimento de otimização é baseado em algoritmos genéticos, utilizando a abordagem de minimização proposta por YELOWLEY e GUN (1989), denominada de “ótima subdivisão” da profundidade de corte, que posteriormente foi aprimorada por GUPTA et al. (1995) e BHASKARA et al. (1998). Nesta abordagem a usinagem multi-passe é considerado como um problema multi-estágio, como ocorre no procedimento de programação dinâmica. O problema de minimização para os passes de desbaste e acabamento é dividido em dois estágios. A minimização da função objetivo (custo ou tempo) é dividida em dois problemas de minimização separados para operações de desbaste e acabamento, visando a otimização da profundidade de corte para os “n” passes de desbaste e o passe de acabamento.

No primeiro estágio um conjunto de profundidades de corte é gerado, entre os limites máximos e mínimos da profundidade de corte para operações de desbaste e acabamento. A seguir calcula-se de forma separada, para as operações de desbaste e acabamento, o custo e/ou tempo mínimo e as velocidades de corte e avanços otimizadas para cada profundidade de corte considerada, utilizando as funções objetivo apresentadas anteriormente para modelos de tempo ou de custo de produção, e as restrições associadas aos modelos.

Em função da resolução da profundidade de corte selecionada (décimo, centésimo ou milésimo de mm) as alternativas de profundidades de corte poderão aumentar de forma geométrica, o que inviabiliza a utilização de abordagens de otimização baseadas em programação dinâmica. Por exemplo, para uma faixa de profundidades de corte entre 1 e 5 mm, o cálculo das condições de corte otimizadas para cada passe de usinagem possível com resolução de 0,1 mm (profundidades de corte 1,0; 1,1; 1,2; ... 4,9 e 5,0) em um PC Pentium III leva dois segundos (BRASKARA et al., 1998); então o cálculo de todos os passes (51) levaria 102 segundos. Caso a resolução fosse de 0,01 mm o cálculo de todos os passes (501) levaria 1.002 segundos, ou seja 16,7 minutos. Caso a resolução fosse de 0,001 mm o cálculo de todos os passes (5001) levaria 10.002 segundos, ou seja 2,9 horas. Desta forma deve haver um compromisso entre a resolução de passe escolhida e o tempo de resolução do problema. Os valores otimizados individualmente são armazenadas e disponibilizados para serem usados no segundo estágio.

No segundo estágio, uma combinação de um pré-determinado subconjunto de profundidades de corte é selecionado, levando em conta a profundidade de corte total a ser removida da peça bruta. Calcula-se, inicialmente, um conjunto de número de passes de usinagem de desbaste (tentativas), em função da profundidade de corte total, profundidade de corte para os passes de acabamento e a máxima profundidade de corte permitida para operações de desbaste: $n_{(i)} = \frac{a_p - a_{ps(i)}}{a_{prU}}$

A seguir utiliza-se uma abordagem de otimização baseada em algoritmos genéticos para determinar o número ótimo de passes de desbaste, a profundidade de corte para cada passe de desbaste e a profundidade de corte para o passe de acabamento, requeridos para obter o mínimo custo e/ou tempo de produção total. Antes da apresentação do algoritmo genético será detalhado cada estágio.

5.1 Primeiro Estágio

Custos e tempos para passes individuais de desbaste e acabamento e suas velocidades de corte e avanços ótimas são determinados para valores fixos de profundidade de corte de acordo com a resolução determinada. No caso serão utilizados incrementos de 0,1 para operações de desbaste e acabamento. De uma forma geral a profundidade de corte para desbaste varia de 1,0 a 10,0 mm (101 opções de passes) e para acabamento de 0,2 a 2,0 mm (19 opções de passes).

O valor ótimo do avanço de acabamento (f_s) é selecionado em função do menor valor de avanço obtido do limite superior das restrições associadas ao avanço: $f_s^* = \min(f_s^1, f_s^2, f_s^3, f_s^4, f_s^5)$

Para f_s^* , T e a_{ps} determina-se a velocidade de corte ótima V_s^* através da equação de vida de Taylor, e o mínimo custo e/ou tempo para a operação de acabamento é calculado da função objetivo. Assim determina-se os parâmetros de corte otimizados, o mínimo custo e o mínimo tempo de produção para cada uma das opções de passes de acabamento, montando-se uma tabela de passe simples de acabamento para $a_{ps(j)}$, $V_{s(j)}$, $f_{s(j)}$, $UC_{s(j)}$, $UT_{s(j)}$ onde j varia de 1, 2, 3, ... s_{passe} .

Procedimento semelhante é adotado para as operações de desbaste, onde monta-se uma tabela de passe simples de desbaste para $a_{pr(j)}$, $V_{r(j)}$, $f_{r(j)}$, $UC_{r(j)}$, $UT_{r(j)}$ onde j varia de 1, 2, 3, ... r_{passe} .

5.2 Segundo Estágio

Neste estágio calcula-se o número de passes de desbaste (n_i), que pode variar em função do intervalo de profundidade de corte de acabamento definido. Deve-se arredondar o valor calculado de n_i , trabalhando-se com um número inteiro, para o intervalo determinado:

$$\frac{a_p - a_{psL}}{a_{prU}} \leq n_i \leq \frac{a_p - a_{psU}}{a_{prU}} \quad (67)$$

Faz-se a seguir uma combinação otimizada dos passes de corte de acabamento a_{ps}^* e $a_{pr(i)}^*$ para $(n_i + 1)$ passes, e o mínimo tempo e custo de usinagem total são determinados. Um algoritmo genético é utilizado para obter a combinação otimizada das profundidades de corte e correspondente funções objetivos, levando em conta as seguintes restrições: deve existir n_i passes de desbaste e um de acabamento; as profundidades de corte individuais de n_i dos passes de desbaste e o passe de acabamento devem estar contidas no intervalo de profundidades de corte de desbaste e acabamento definidos pelo sistema/usuário; a soma das profundidades de corte individuais para $(n_i + 1)$ passes deve ser igual a profundidade total de material a ser removida da feature de usinagem⁴.

6. ALGORITMO GENÉTICO

O algoritmo genético (GA) é iniciado com um conjunto de profundidade de corte com $(n_i + 1)$ passes escolhidos de forma aleatória dos passes individuais de desbaste e acabamento calculados no primeiro estágio, sendo um método de pesquisa adaptativo geral que permite a determinação do ótimo global a partir de funções objetivos (função custo, *fitness*). O algoritmo faz analogia com mecanismos utilizados pela evolução biológica natural. A partir do conjunto inicial, novos e melhores conjuntos são reproduzidos usando alguns indivíduos dos grupos selecionados por suas respectivas aptidões.

Um candidato a solução, um ponto no espaço de pesquisa, é representado por uma seqüência de números (binário ou decimal) denominado de cromossomo ou uma *string*. A probabilidade de seleção de um cromossomo é

⁴Feature de usinagem é a porção ou parte da peça afetada pela operação de usinagem.

diretamente proporcional ao valor da sua função objetivo (*fitness*). A busca tem início sobre uma população inicial que é formada por um conjunto de cromossomos. Cada cromossomo, uma *string*, é representado por uma coleção de $n + 1$ elementos (genes) correspondendo a $n + 1$ passes, sendo n o número de passes de desbaste; e um o passe de acabamento.

A geração inicial é formada por uma população de 10 cromossomos. Quatro operadores podem atuar sobre a população de uma geração:

- Reprodução: seleção de cópias de cromossomos proporcionais ao valor da função objetivo (seleção de pares via *Roulette Wheel*);
- *Crossover* (Recombinação): uma troca de secções de cromossomos entre pares (definição de pontos de *crossover* e dos pares de cromossomos). Utiliza-se uma probabilidade de *crossover* de 80% (PCROSS);
- Mutação: uma modificação randômica de cromossomos. Utiliza-se uma pequena probabilidade de mutação de 10% (PMUT);
- Ajuste de valores no cromossomo: este quarto operador é introduzido a fim de ajustar os valores das *strings* dos genes para respeitar as três restrições impostas à função objetivo (segundo estágio).

Como estratégia de solução é utilizado uma codificação em *strings* de $(n+1)$ números reais, que representam n passes de desbaste e um passe de acabamento. Se $n_i = 3$, teremos 3 passes de desbaste e um passe de acabamento, sendo representado por uma *string* de números reais com quatro elementos (genes). Utiliza-se um algoritmo genético modificado, fazendo-se ajustes de valores nos *strings* (cromossomos), caso seus valores não respeitem as restrições associadas à profundidade de corte, após a operação de *crossover* e mutação.

O tamanho da população inicial é de 10 cromossomos (*strings*) e o algoritmo gera quinhentas gerações para obtenção do ótimo global.

7. CONCLUSÃO

O método proposto e em implementação em um sistema integrado CAD/CAPP/CAM (ÁLVARES e FERREIRA, 2003) se diferencia dos métodos apresentados na revisão de literatura nos seguintes aspectos:

- formulação do problema a ser otimizado: As trajetórias da(s) ferramenta(s) consistem em múltiplos passes de usinagem e um passe de acabamento, onde os passes de desbaste (multi-passe) é utilizado para deixar um sobrematerial para a operação de acabamento (passe simples), que é executada ao longo do perfil da peça. São otimizadas as condições de corte para operações de torneamento interno e externo longitudinal linear, longitudinal cônico e longitudinal circular, faceamento, corte, sangramento, furação e recartilhamento; englobando todas as features de projeto descritas na taxonomia de features utilizada baseada em CAM-I (1986).
- modelo matemático relativo ao tempo de corte para as operações de usinagem consideradas (abordagem multi-passe): Modelo matemático de tempos para operações multi-passes com diferentes profundidades de corte para torneamento interno e externo longitudinal linear, longitudinal cônico e longitudinal circular, faceamento, perfilamento, corte, sangramento, furação e recartilhamento. O modelo multi-passe leva em consideração as operações de desbaste e acabamento simultaneamente, sendo o sobrematerial de acabamento uma restrição para o desbaste, e a profundidade de corte de desbaste é igual a profundidade de corte total menos a profundidade de corte de acabamento. Cada feature de usinagem poderá ter vários modelos matemáticos em função das alternativas disponíveis no grafo E/OU (plano de processos não linear) das features de usinagem consideradas (*workingstep*⁵ do *workplan* associado, adotando terminologia STEP NC (HAN, 2001)), sendo que as operações de acabamento e desbaste poderão ser executadas com ferramentas diferentes.
- função objetivo: Cada modelo de tempo associado a uma determinada operação de usinagem tem uma função objetivo. Assim têm-se várias funções objetivo para cada alternativa de usinagem considerada, associada a cada uma das features de usinagem da peça (*workingstep*).
- método de resolução do problema de otimização, com resolução do problema de forma conjunta para as operações de desbaste e de acabamento, baseado em algoritmos genéticos. A diferença do método proposto em relação aos propostos por REDDY et al. (1988), ONWUBOLU e KUMALO (2001) e CHEN e CHEN (2003), concentra-se no fato do algoritmo genético ser aplicado para operações multi-passe com diferentes profundidades de corte, e de estar integrado a um sistema CAPP, bem como, trabalhar com operações alternativas.

Inclui como contribuição: o tratamento de operações de usinagem com alternativas, aumentando a amplitude das operações de usinagem a serem otimizadas, como torneamento interno, alargamento, furação, perfilamento, recartilhamento e corte; a otimização pode ser feita como uma função objetivo baseada em mínimo custo ou na máxima taxa de produção; a profundidade de corte para cada passe de usinagem nas operações de desbaste não são necessariamente iguais, podendo variar de um passe de desbaste a outro; na integração de um método de otimização em um sistema de CAPP, ou seja, esta atividade de otimização é um sub-sistema do CAPP, sendo tratado como um componente/módulo automatizado do sistema de planejamento de processo proposto; pode-se utilizar ferramentas de corte diferentes no desbaste e no acabamento nas operações multi-passes.

⁵ Segundo STEP-NC Part 10, um Machining_ *workingstep* associa uma operação de usinagem a uma única feature de usinagem, incluindo também um plano de segurança.

8. REFERÊNCIAS

- Álvares, A.J. e Ferreira, J. C. E., CAD/CAPP/CAM Integration Methodology for the Remote Manufacture of Cylindrical Parts Through the Web, 17 Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM), São Paulo, SP, 10 a 14 de novembro, 2003 .
- Baykasoglu, A., Dereli T., Novel algorithmic approach to generate the 'number of passes' and 'depth of cuts' for the optimization routines of multipass machining, International Journal of Production Research, Taylor & Francis, Volume 40, Number 7/May 01, 2002.
- Bhaskara, R.S.V., Shunmugam, M.S., Narendran, T.T., Optimal sub-division of the depth of cut to achieve minimum production cost in multi-pass turning using a genetic algorithm, Journal of Material Processing Technology, 79, 1998, pp. 101-108.
- CAM-I, Deere & Company, Part Features for Process Planning, Moline Illinois, CAM-I, 1986.
- Chang, T.C., Wysk R.A. e Wang, H.P., 1998, "Computer Aided Manufacturing", Prentice Hall International Series in Industrial and Systems Engineering, W.J. Fabrycky e J.H. Mize (eds.), 2ns Edition, 1998.
- Chen, M.C., Chen K.Y., Optimization of multipass turning operations with genetic algorithms: a note, International Journal of Production Research, Volume 41, Number 14/20, September, 2003.
- Chen, M.-C., Su,C.-T, 1999, Computer-aided optimization of multi-pass turning operations for continuous forms on CNC lathes, IIE Transactions, Jul 1999, 31, pp. 583-596.
- Chen, M.-C. and Su, C.-T., 1998, Optimization of machining conditions for Turning Cylindrical Stocks into Continuous Finished Profiles, International Journal of Production Research, Vol. 36, No. 8, pp. 2115-2130, 1998.
- Chen, M.-C. and Tsai, D.-M., 1996, A Simulated Annealing Approach for Optimization of Multi-pass Turning Operations, International Journal of Production Research, Vol. 34, No. 10, pp. 2803-2825, 1996.
- Gupta, R., Batra, J.L., LAL, G.K., Determination of optimal subdivision of depth of cut in multipass turning with constraints, Int. J. Prod. Res. 1995, vol. 33, no.9, pp. 2555-2565.
- Han, J., Application of ISO 14649 STEP-NC Data Model for CAPP/NC Integration, These Industrial Engineering, Pohang University of Science & Technology, February 2001.
- Khan, Z., Prasad, B., Singh, T., Machining Condition Optimization by Genetic Algorithms and Simulated Annealing, Computers Ops Res., Vol24, No. 7, pp 647-657, 1997.
- Lee, J.W., A study on the determination of actual cutting time in NC turning, Int. J. Prod. Res., Vol. 26, No. 9, pp. 1547-1559, 1988.
- Onwubolu, G.C., Kumalo, C., Optimization of multipass turning operations with genetic algorithms, International Journal of Production Research, Taylor & Francis, Volume 39, Number 16/November 10, 2001.
- Onwubolu, G.C., Kumalo, C., Multi-pass turning operations optimization based on genetic algorithms, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 215,1, pp. 117-124, 2001.
- Reddy, S.V.B., Shunmugam, M.S., Narendran, T.T., Optimal sub-divison of the depth of cut to achieve minimum production cost in multi-pass turning using genetic algorithm, Journal of Materials Processing Technology, 79, pp. 101-108, 1998.
- Shin, Y.C. e Joo, Y. S., Optimization of machining conditions with practical constraints, International Journal Production Research, Vol. 30, pp. 2907-2919, 1992.
- Tan, F.P., Creese, R.C., A generalized multi-pass machining model for machining parameter selection in turning, Int. J. Prod. Rese, Vol. 33, No. 5, 1467-1487, 1995.
- Wang, X., Da, Z.J., Balaji, A.K., et al., Performance-based optimal selection of cutting conditions and cutting tools in multipass turning operations using genetic algorithms, International Journal of Production Research, Taylor & Francis, Volume 40, Number 9/June 01, 2002.
- Wang, X., Jawahir, I.S., Optimization of Multi-pass Turning Operations Using Genetic Algorithms for the Selection of Cutting Conditions and Cutting Tools with Tool-wear Effect, IEEE (0-7803-7078-3/01), pp. 3093-3100, 2001.

Alberto José Álvares

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica, Graco - Grupo de Automação e Controle, 70.910-300, Brasília, email: alvares@AlvaresTech.com

João Carlos Espíndola Ferreira

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Grupo de Integração da Manufatura - Grima, 88040-900, Florianópolis, SC, email: jcf@grucon.ufsc.br

Abstract. *This work presents a new optimization method based on genetic algorithms for optimization of the cutting conditions in operations of turning multi-pass, where the minimization of the function objective, based on cost and time, it is divided in two problems separate from minimization of the operations of finishing and roughing, in order to optimize the depth of roughg cut and of finish, the number of machining passes, the cutiting speed, the feed rates and the progress for each individual pass. Initially the formulation of the problem is presented, following by the widespread mathematical model of times for machining multi-pass and of the formulation of the function objective. To follow the function objective it is presented to be optimized and the genetic algorithm proposed to obtain the great place.*

Keywords. *Optimization, Turning, CAPP, Numeric Control, Genetic Algorithms.*