

ESCOLA POLITÉCNICA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PMC 581
Projeto Mecânico II

Projeto Básico

Otimização do Processo de Usinagem de
Moldes de Injeção

Prof. Orientador:

Marco Stipkovic Filho

Alexandre Della Valle Araki
Dalton Maeda Yamaguishi

nº USP: 2859353
nº USP: 2803996

Índice

1. INTRODUÇÃO	4
2. CONSTRUÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS	7
2.1. Cálculo das Forças e Potências de Corte	8
2.1.1. Força de Corte	8
2.1.2. Potência de Corte	12
2.2. Determinação do Intervalo de Máxima Eficiência	13
2.2.1. Cálculo da Velocidade de Máxima Produção	15
2.2.2. Cálculo da Velocidade de Mínimo Custo	23
3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	<u>29</u>
4. ANÁLISE DE COMPATIBILIDADE	30
5. ANÁLISE DE ESTABILIDADE	31
6. LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO	32
6.1. Material	32
6.2. Ferramentas	32
6.3. Máquina	33
6.4. Matriz	34
6.5. Macho	35
7. TRATAMENTO DOS DADOS DO PROJETO	38
7.1. Memoriais de Cálculo	38
7.2. Resultados Obtidos	45
7.2.1. Matriz	45
7.2.2. Macho	46

8. CONCLUSÃO	49
9. BIBLIOGRAFIA	51
10. APÊNDICES	52
10.1. Apêndice A - Índice de Variáveis Utilizadas Neste Trabalho	53
10.2. Apêndice B - Desenhos	55
10.3. Apêndice C - Catálogos	60

1. Introdução

Este trabalho tem como finalidade atender ao curso PMC-581 - Projeto Mecânico II, dando continuidade ao trabalho realizado no primeiro semestre de 1996, Estudo de Viabilidade, que visava atender ao curso PMC-580 - Projeto Mecânico I. Do mesmo modo que o trabalho anterior, o presente será orientado de acordo com os conceitos aprendidos na disciplina PMC-475 - Metodologia do Projeto, ministrada pelo Prof. Omar Moore de Madureira.

O objetivo principal deste trabalho é a formulação do Projeto Básico, ou seja, o estabelecimento da concepção do projeto em si, que servirá de base para a realização do Projeto Executivo, onde será efetuada a implementação do mesmo.

No nosso caso em particular, o projeto é um estudo de otimização de um processo de usinagem, o que não implica na construção de um protótipo, mas sim na formulação do método de avaliação e proposição de modificações, no intuito de alcançar nosso objetivo. Para a abordagem deste processo focalizaremos o torneamento, principal operação na usinagem dos moldes em questão.

Para tanto dividimos o trabalho nos seguintes tópicos, seguindo o roteiro proposto pela disciplina PMC-475, e ao mesmo tempo adequando nosso estudo a um projeto mecânico:

- *Escolha da Melhor Solução:* primeiramente devemos escolher entre as possíveis soluções, levando em conta todas as vantagens e desvantagens de cada opção. Especificamente no nosso caso, esta etapa será suprimida devido a uma única solução adotada no Estudo de Viabilidade, constituindo-se no levantamento e tratamento de dados, e posterior plano de otimização.
- *Construção dos Modelos Matemáticos:* para formalizar o projeto a partir da idéia abstrata, devemos expressá-la na forma de equações matemáticas, a fim de transformar a idéia em algo mais palpável e mais facilmente visível.

- *Análise de Sensibilidade:* dentro da formulação estabelecida temos as diversas variáveis ou parâmetros, que influenciam de maneira diferente nos resultados obtidos no estudo. É a intensidade destas influências que devemos analisar, com o propósito de saber quais são as variáveis determinantes mais importantes, e qual a confiabilidade que devemos atribuir ao método de análise adotado.
- *Análise de Compatibilidade:* nesta etapa deve-se tentar harmonizar o máximo possível todos os elementos envolvidos no projeto. Isto envolve o inter-relacionamento entre o método de estudo e todas as suas variáveis como parâmetros de corte, máquinas, ferramentas, materiais e mão-de-obra.
- *Análise de Estabilidade:* o projeto deve prever as perturbações externas que podem afetar seus parâmetros, a fim de responder bem a qualquer variação de naturezas diversas, como o mercado de materiais, ferramentas e mão-de-obra.
- *Levantamento dos Parâmetros do Projeto:* de acordo com a formulação matemática devemos fazer o levantamento de dados necessários para o estudo.
- *Tratamento dos Dados:* com os dados em mão devemos aplicar a metodologia adotada, sempre com a sensibilidade e o senso crítico de um engenheiro.
- *Otimização Formal:* esta etapa deveria transcorrer ao longo das duas etapas anteriores, visando a escolha da melhor solução para o projeto, através das combinações dos parâmetros escolhidos e da determinação da combinação ótima. Novamente, devido à peculiaridade do nosso estudo, esta também será suprimida.
- *Previsões para o Futuro:* duas são as questões envolvidas na projeção do projeto no período em que será realmente implementado. A primeira diz respeito às condições de mercado no futuro, que poderão, dependendo de suas variações, influir decisivamente no projeto. A segunda é referente à obsolescência do projeto, que envolve as inovações tecnológicas, como o desenvolvimento de novas máquinas e ferramentas.

Ao fim de todas essas etapas, poderemos implementar a otimização, de acordo com os interesses e as possibilidades da empresa, no que diz respeito à disponibilidade e/ou iniciativa de investimento em máquinas, mão-de-obra, material e ferramentas.

2. Construção dos Modelos Matemáticos

Nesta etapa do trabalho vamos iniciar a formulação matemática para o problema em questão. Para isso apresentaremos a teoria a ser adotada, assim como os motivos da nossa escolha. Este processo envolverá parâmetros inerentes à usinagem das peças em estudo, assim como a adequação das formulações ao nosso projeto.

O tratamento de dados será dividido em duas partes, baseado na teoria aprendida na disciplina PMC-581 - Máquinas de Fabricação I, ministrada pelo Prof. Marco Stipkovic Filho:

1. Cálculo das Forças e Potências de Corte
2. Determinação do Intervalo de Máxima Eficiência
 - Cálculo da Velocidade de Máxima Produção
 - Cálculo da Velocidade de Mínimo Custo

2.1. Cálculo das Forças e Potências de Corte

De acordo com a bibliografia consultada, dentre os vários métodos de cálculo das forças e potências de corte, o critério de Kienzle apresenta uma formulação mais simplificada e mais próxima da realidade. O método baseia-se na teoria de que a força principal de corte é obtida através do produto da pressão específica de corte pela seção do cavaco formado, sendo que esta pressão específica é função do avanço de corte.

2.1.1. Força de Corte

As forças de corte, em um processo de torneamento, dividem-se em força tangencial, força longitudinal e força radial de corte. A força tangencial de corte representa a maior componente, e é também denominada de força principal de corte.

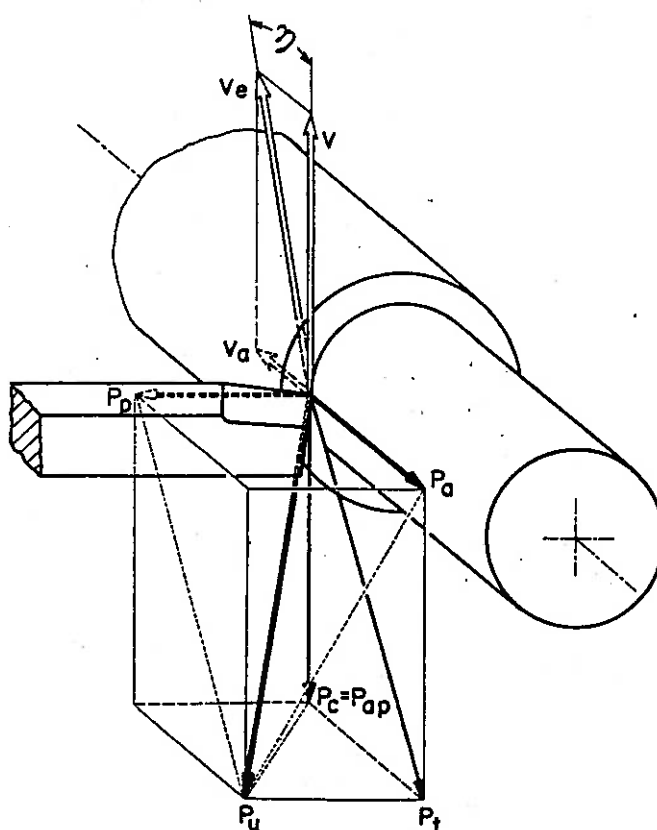


Figura 1 - Componentes da força de usinagem no torneamento, segundo a norma DIN 6584.

A força longitudinal ou de avanço é aproximadamente 40% menor do que a força tangencial, enquanto que a força radial, a menor de todas, representa aproximadamente 50% do valor da força longitudinal.

Na figura 1 podemos ver as três componentes da força de corte.

Nosso estudo dará maior enfoque à força principal de corte, uma vez que ela é a maior responsável pela potência de corte. Isto pode ser compreendido, já que a potência é dada pelo produto entre a força de corte e a velocidade na mesma direção, que no caso da força tangencial é infinitamente maior do que as outras velocidades.

Por muito tempo a força principal de corte foi calculada pelo produto:

$$F = K_s \cdot S$$

onde: K_s = pressão específica de corte em Kgf/mm^2

S = seção do cavaco em mm^2

Conforme o critério de Kienzle o valor de K_s varia em função do avanço de corte. Este valor no entanto também varia de acordo com o ângulo de posição (χ) da ferramenta de corte. Para desvincular a pressão específica deste ângulo podemos, no cálculo da seção do cavaco, substituir o avanço (a) e a profundidade (p) de corte pela espessura (h) e a largura (b) do cavaco respectivamente (figura 2).

$$S = a \cdot p = b \cdot h$$

$$a = \frac{h}{\sin \chi}$$

$$p = b \cdot \sin \chi$$

$$F = K_s \cdot S = K_s \cdot a \cdot p = K_s \cdot b \cdot h$$

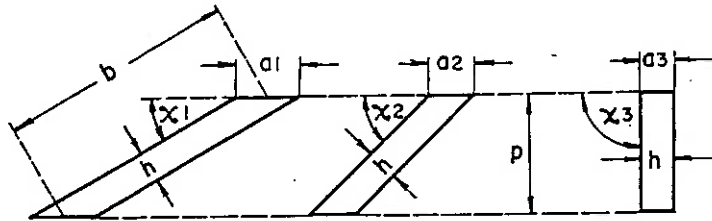


Figura 2 - Seções de corte com iguais espessuras de corte h .

A dependência de K_s pelo avanço pode ser estendida à espessura do cavaco, resultando na seguinte expressão:

$$K_s = \frac{K_{s_{1,1}}}{h^z}$$

$$F = b \cdot h^{(1-z)} \cdot K_{s_{1,1}}$$

onde: $K_{s_{1,1}}$ = força de corte necessária para retirada de um cavaco de 1mm de largura por 1mm de espessura para um dado material
 z = constante característica do material

Notamos agora que K_s é fortemente dependente de h . De acordo com os estudos de Kienzle podemos ainda relacionar F e b , definindo a força principal de corte por mm de largura de cavaco:

$$\frac{F}{b} = h^{(1-z)} \cdot K_{s_{1,1}}$$

A representação de todas essas grandezas podem ser observadas nas figuras 3 e 4, através de gráficos bilogarítmicos.

Há porém, dispersões nos valores de F/b de acordo com a variação da velocidade de corte.

Devemos ainda nos lembrar que, para cada par peça-ferramenta, o valor da força principal de corte possui um comportamento diferente em função da velocidade de corte. Existem diversas curvas para análise deste comportamento.

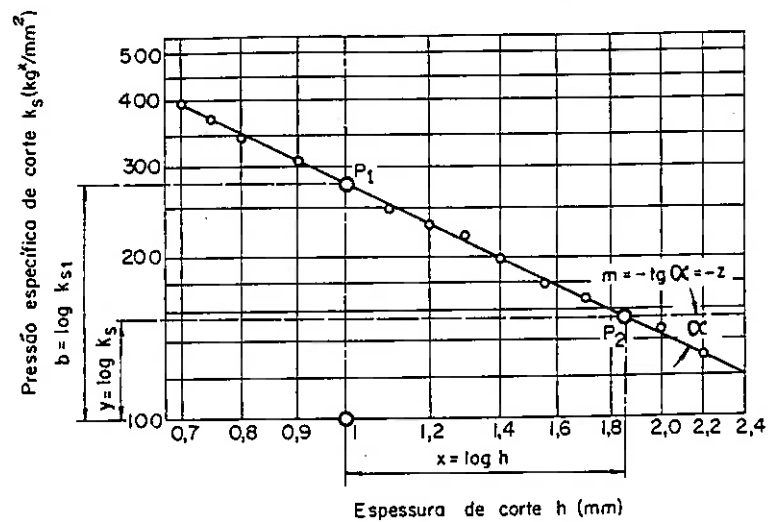


Figura 3 - Representação em papel bilogarítmico da pressão específica de corte K_s em função de h .

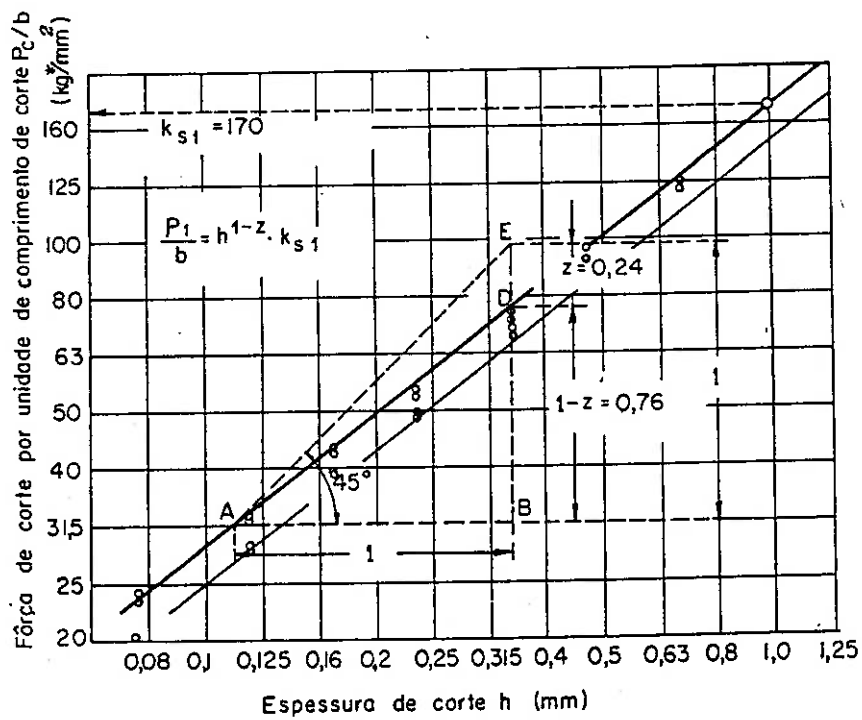


Figura 4 - Representação em papel bilogarítmico da força de corte por largura de cavaco F/b em função de h e determinação gráfica das constantes K_{s1} e z do material 34 CrMo 4, segundo Kienzle.

2.1.2. Potência de Corte

O cálculo da potência de corte se resume no produto da força de corte pela velocidade de corte. Da mesma forma que no caso das forças de corte podemos decompor a potência em três direções distintas: tangencial, longitudinal e radial. A potência devido à força radial, levando em conta que na operação de torneamento a velocidade radial é zero, pode ser descartada. A potência devido à força longitudinal também pode ser desprezada, uma vez que a velocidade de avanço dada pelo produto da rotação pelo avanço por revolução é muito inferior à velocidade tangencial. Devemos lembrar ainda que a força tangencial é maior que a força longitudinal.

Portanto, a equação que define o cálculo da potência de corte no caso do torneamento é dada por:

$$N = \frac{F \cdot V}{60 \cdot 75}$$

onde: N = potência de corte em CV

F = força de corte em Kgf

V = velocidade de corte em m/min

Com a potência de corte em mãos poderemos comparar mais tarde a capacidade instalada na fábrica com o realmente necessário para realizar os trabalhos hoje efetuados na confecção dos moldes de injeção.

2.2. Determinação do Intervalo de Máxima Eficiência

Para alcançar nosso objetivo, ou seja, implementar a otimização do processo de usinagem, iremos determinar quais as velocidades de corte que nos darão uma melhor resposta em termos de custo e produção. O Intervalo de Máxima Eficiência limita as velocidades a serem empregadas, tendo como referência as velocidades de mínimo custo e de máxima produção. A partir destes limites, devemos tentar sempre trabalhar dentro deste intervalo. Trabalhar abaixo da velocidade de mínimo custo traria prejuízos em termos de custos, enquanto que trabalhar acima da velocidade de máxima produção acarretaria em perdas na própria produção (figura 5).

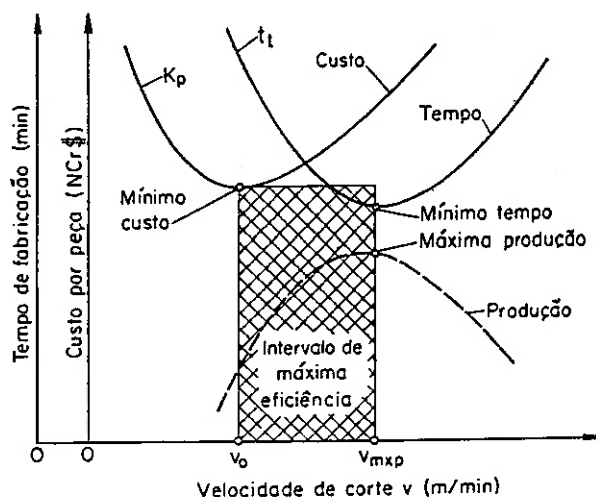


Figura 5 - Determinação do Intervalo de Máxima Eficiência.

Porém, antes de equacionar essas velocidades vamos introduzir o conceito apresentado por Taylor, traduzido na equação que relaciona a velocidade de corte com o tempo de usinagem:

$$V \cdot T^n = K$$

onde: V = velocidade de corte em m/min

T = tempo de vida da ferramenta (para cada afiação) ou de usinagem

n = expoente experimental em função do par ferramenta-material usado

K = constante do processo

De acordo com a expressão de Taylor, o valor de $(V.T^n)$ é constante para uma dada configuração de usinagem. O valor de n é tabelado experimentalmente, e varia de acordo com o material da peça a ser usinada e da ferramenta utilizada. Para facilitar a determinação das velocidades de máxima produção e mínimo custo define-se a velocidade de corte V_{60} , representando a velocidade para que a ferramenta tenha uma vida de 60 minutos. Ou seja:

$$V_{60} \cdot 60^n = K$$

É também usual a utilização de outras faixas de velocidades, como V_{15} , V_{30} , V_{120} , V_{240} , e assim por diante. A determinação desses valores é feita por intermédio de fatores multiplicadores tabelados.

A velocidade V_{60} , pelos estudos da ASTM pode ser determinada da seguinte forma:

$$V_{60} = \frac{C_a}{a^x \cdot p^y}$$

onde: C_a = constante em função da dureza BRINELL do material usinado

a = avanço em mm/rot

p = profundidade de corte em mm

x e y = expoentes experimentais em função do material usinado (para o aço temos $x=0,42$ e $y=0,14$)

Veremos a seguir como determinar os valores de velocidades de máxima produção e mínimo custo a partir de custos diretos e indiretos da produção.

2.2.1. Cálculo da Velocidade de Máxima Produção

De acordo com os estudos de Gilbert, o equacionamento desta velocidade despreza todas influências indiretas do processo de corte, levando em consideração apenas o tempo de troca da ferramenta. Um resumo da resolução de seu estudo apresenta-se a seguir.

Considerando que a confecção de uma peça se resume em uma operação, o tempo total de confecção de cada peça é dado por:

$$t_t = t_c + t_a + t_s + t_{pi} + \frac{t_p}{Z} + \frac{n_t}{Z} \cdot (t_{ft} + t_{fa})$$

onde: t_t = tempo total de confecção de cada peça

t_c = tempo efetivo de corte

t_a = tempo de posicionamento da ferramenta (aproximação e afastamento)

t_s = tempo secundário para posicionamento e retirada de cada peça

t_p = tempo de preparação ou setup da máquina

t_{pi} = tempo de preparação para cada peça

n_t = número de trocas de ferramentas no lote Z

Z = número de peças no lote

t_{ft} = tempo de troca da ferramenta por desgaste

t_{fa} = tempo de afiação da ferramenta

No entanto, o tempo n_t pode ser dado por:

$$Z = (n_t + 1) \cdot Z_t = (n_t + 1) \cdot \frac{T}{t_c}$$

$$n_t = \frac{Z \cdot t_c}{T} - 1$$

onde: Z_t = número de peças usinadas durante a vida T da ferramenta

Substituindo esta última equação na primeira, temos:

$$t_t = t_c + t_a + t_s + t_{pi} + \frac{t_p}{Z} + \left(\frac{t_c}{T} - \frac{1}{Z} \right) \cdot (t_{ft} + t_{fa})$$

Para o caso do torneamento o tempo efetivo de corte t_c pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$t_c = \frac{l_a}{a \cdot n} = \frac{l_a}{a \cdot \left(\frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d} \right)} = \frac{l_a \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot a \cdot V}$$

onde: l_a = comprimento da seção usinada em mm

a = avanço em mm/rot

n = rotação em rpm

V = velocidade de corte em m/min

d = diâmetro da seção usinada em mm

Efetuada-se nova substituição, temos:

$$t_t = \frac{l_a \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot a \cdot V} + t_a + t_s + t_{pi} + \frac{t_p}{Z} + \left(\frac{l_a \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot a \cdot V \cdot T} - \frac{1}{Z} \right) \cdot (t_{ft} + t_{fa})$$

A vida da ferramenta T por sua vez, medida entre duas afiações consecutivas, pode ser obtida pela equação de Taylor:

$$V \cdot T^n = K$$

que pode ser também escrita da seguinte forma:

$$V^x \cdot T = K \quad \text{ou} \quad T = \frac{K}{V^x}$$

onde: $x = 1/n$

Substituindo-se T na expressão de t_t , temos:

$$t_t = \frac{l_a \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot a \cdot V} + t_a + t_s + t_{pi} + \frac{t_p}{Z} + \left(\frac{l_a \cdot \pi \cdot d \cdot V^{(x-1)}}{1000 \cdot a \cdot K} - \frac{1}{Z} \right) \cdot (t_{ft} + t_{fa})$$

Podemos separar a expressão do tempo total de confecção de uma peça em três partes distintas:

- tempo de corte: $t_c = \frac{l_a \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot a \cdot V}$
- tempo secundário: $t_1 = t_a + t_s + t_{pi} + \frac{t_p}{Z}$
- tempo de ferramental: $t_2 = \left(\frac{l_a \cdot \pi \cdot d \cdot V^{(x-1)}}{1000 \cdot a \cdot K} - \frac{1}{Z} \right) \cdot (t_{ft} + t_{fa})$

Nota-se que apenas t_c e t_2 são função da velocidade de corte V . O tempo de corte efetivo t_c diminui conforme V aumenta, o que já era esperado. Já o tempo t_2 aumenta com o aumento de V devido ao maior desgaste das ferramentas e o conseqüente maior número de trocas e afiações. O tempo t_1 por sua vez se mantém constante devido a sua natureza de preparação do conjunto máquina, peça e ferramenta, que não varia com a velocidade de corte. O comportamento de cada parcela de t_t pode ser visto na figura 6.

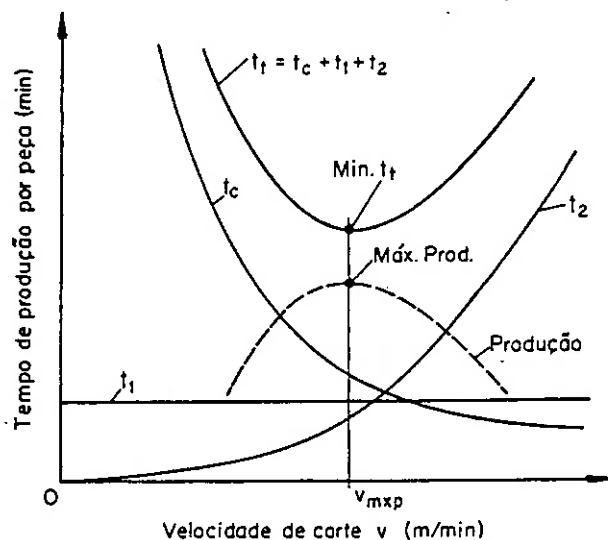


Figura 6 - Representação das diferentes parcelas de t_t em função da velocidade de corte.

Note que o tempo de posicionamento para a troca da ferramenta por desgaste já está embutido em t_t e não em t_a .

O valor da velocidade de máxima produção corresponde à velocidade no ponto onde o tempo de confecção da peça é mínimo. Na figura 6 podemos notar que a curva t_t possui curvatura para cima, e portanto o cálculo de seu valor mínimo é dado pela sua derivada em função da velocidade:

$$\frac{dt_t}{dV} = 0$$

$$\frac{dt_t}{dV} = -\frac{l_a \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot a \cdot V_{mp}^2} + (x-1) \frac{l_a \cdot \pi \cdot d \cdot V_{mp}^{(x-2)}}{1000 \cdot a \cdot K} (t_t + t_{fa}) = 0$$

$$-\frac{1}{V_{mp}^2} + (x-1) \frac{V_{mp}^{(x-2)}}{K} (t_t + t_{fa}) = 0$$

$$V_{mp} = \sqrt[x]{\frac{K}{(x-1) \cdot (t_t + t_{fa})}}$$

No nosso caso em particular, o valor de t_{fa} pode ser considerado igual a zero, pois a operação de afiação das ferramentas, quando ocorrem, são feitas fora da área de usinagem ou até da empresa, não influenciando no processo de usinagem. Assim a equação toma a seguinte forma:

$$V_{mp} = \sqrt[x]{\frac{K}{(x-1) \cdot t_t}}$$

Com esta expressão podemos então calcular as velocidades que proporcionam máxima produção.

Vemos que, de todos os tempos antes citados, somente o tempo de troca de ferramentas por desgaste influi no cálculo de V_{mp} . Podemos assim estender esta fórmula para o caso em que são utilizadas mais de uma ferramenta ou realizada mais de uma operação durante a usinagem de uma determinada peça (sem a retirada da peça). O único diferencial está no cálculo dos parâmetros envolvidos em cada operação, resultando em velocidades de máxima produção para cada uma delas.

Os valores de K e x serão obtidos a partir da equação de Taylor, sendo os valores das constantes necessárias obtidos em tabelas e catálogos em anexo.

Já para o caso de faceamento somos obrigados a definir uma velocidade equivalente V_r , que servirá de auxílio na nossa análise:

$$V = \frac{\pi \cdot n \cdot d}{1000} = \frac{\pi \cdot n}{1000} \cdot (d_1 - 2 \cdot a \cdot n \cdot t)$$

onde: V = velocidade em função da posição da ferramenta em v/min

n = rotação em rpm

d = diâmetro na usinagem em função do tempo t , em mm

d_1 = diâmetro externo de faceamento em mm

a = avanço radial da ferramenta em mm/rot

Para visualizar estas grandezas veja a figura 7.

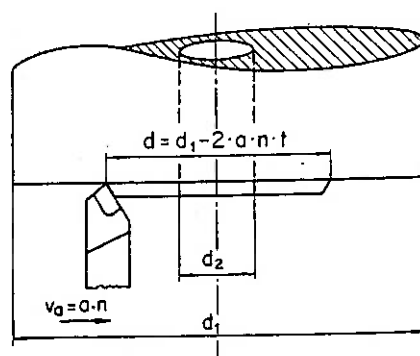


Figura 7 - Representação do faceamento de uma peça.

Utilizando-se novamente da equação de Taylor e considerando um intervalo de tempo dt , temos:

$$V^x \cdot dt = dK$$

$$\left[\frac{\pi \cdot n}{1000} \cdot (d_1 - 2 \cdot a \cdot n \cdot t) \right]^x \cdot dt = dK$$

Integrando-se no intervalo de tempo ΔT de usinagem, temos:

$$\left(\frac{\pi \cdot n}{1000} \right)^x \cdot \int_0^{\Delta T} (d_1 - 2 \cdot a \cdot n \cdot t)^x \cdot dt = K$$

$$\left(\frac{\pi \cdot n}{1000} \right)^x \cdot \frac{-(d_1 - 2 \cdot a \cdot n \cdot t)^{x+1}}{(x+1) \cdot 2 \cdot a \cdot n} \Big|_0^{\Delta T} = K$$

$$\left(\frac{\pi \cdot n}{1000} \right)^x \cdot \frac{d_1^{x+1} - (d_1 - 2 \cdot a \cdot n \cdot \Delta T)^{x+1}}{(x+1) \cdot 2 \cdot a \cdot n} = K$$

$$V_r^x \cdot \Delta T = K$$

$$\left(\frac{\pi \cdot n}{1000} \right)^x \cdot \frac{d_1^{x+1} - (d_1 - 2 \cdot a \cdot n \cdot \Delta T)^{x+1}}{(x+1) \cdot 2 \cdot a \cdot n} = V_r^x \cdot \Delta T$$

Sabemos que $d_1 = d_2 + 2 \cdot a \cdot n \cdot \Delta T$, temos:

$$\left(\frac{\pi \cdot n}{1000} \right)^x \cdot \frac{d_1^{x+1} - d_2^{x+1}}{(x+1) \cdot 2 \cdot a \cdot n} = V_r^x \cdot \Delta T$$

$$\left(\frac{\pi \cdot n}{1000} \right)^x \cdot \frac{d_1^{x+1} - d_2^{x+1}}{(x+1) \cdot 2 \cdot a \cdot n} = V_r^x \cdot \frac{d_1 - d_2}{2 \cdot a \cdot n}$$

$$V_r = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot n}{1000} \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{x+1}}{(x+1) \cdot \left(1 - \frac{d_2}{d_1} \right)} \right]^{\frac{1}{x}}$$

Fazendo:

$$D_x = \left[\frac{1 - \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{x+1}}{(x+1) \cdot \left(1 - \frac{d_2}{d_1} \right)} \right]^{\frac{1}{x}}$$

Temos:

$$\boxed{V_r = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot n}{1000} \cdot D_x}$$

Este parâmetro servirá de referência para a otimização, pois determinaremos o cálculo desta velocidade para a máxima produção, e posteriormente a respectiva rotação.

O tempo de corte para o faceamento fica então sendo:

$$t_c = \frac{d_1 - d_2}{2 \cdot a \cdot n}$$

Com: $n = \frac{1000 \cdot V_r}{\pi \cdot d_1 \cdot D_x} :$

$$t_c = \frac{(d_1 - d_2) \cdot \pi \cdot d_1 \cdot D_x}{2000 \cdot a \cdot V_r}$$

Analogamente ao cálculo para o torneamento temos:

$$t_t = \frac{(d_1 - d_2) \cdot \pi \cdot d_1 \cdot D_x}{2000 \cdot a \cdot V_r} + t_a + t_s + t_{pi} + \frac{t_p}{Z} + \left(\frac{(d_1 - d_2) \cdot \pi \cdot d_1 \cdot D_x}{2000 \cdot a \cdot V_r \cdot T} - \frac{1}{Z} \right) \cdot t_{ft}$$

$$t_t = \frac{(d_1 - d_2) \cdot \pi \cdot d_1 \cdot D_x}{2000 \cdot a \cdot V_r} + t_a + t_s + t_{pi} + \frac{t_p}{Z} + \left(\frac{(d_1 - d_2) \cdot \pi \cdot d_1 \cdot D_x \cdot V_r^{x-1}}{2000 \cdot a \cdot K} - \frac{1}{Z} \right) \cdot t_{ft}$$

$$\frac{dt_t}{dV_r} = -\frac{(d_1 - d_2) \cdot \pi \cdot d_1 \cdot D_x}{2000 \cdot a \cdot V_r^2} + (X - 1) \cdot \frac{(d_1 - d_2) \cdot \pi \cdot d_1 \cdot D_x \cdot V_r^{x-2}}{2000 \cdot a \cdot K} \cdot t_{ft} = 0$$

$$-\frac{1}{V_{rmp}^2} + (X - 1) \cdot \frac{V_{rmp}^{x-2}}{K} \cdot t_{ft} = 0$$

$$V_{rmp} = \sqrt[x]{\frac{K}{(x-1) \cdot t_{ft}}}$$

Note que já consideramos t_{fa} igual a zero como foi discutido anteriormente.

Portanto podemos utilizar o mesmo valor tanto para o torneamento como para o faceamento. Vale dizer que para o faceamento o que realmente importa é a rotação para máxima produção calculada pela velocidade equivalente, pois a velocidade real é variável.

2.2.2. Cálculo da Velocidade de Mínimo Custo

Com base nos estudos de Gilbert novamente, o equacionamento desta velocidade leva em consideração as influências indiretas do processo de corte, ou os custos envolvidos no processo de usinagem. A resolução da fórmula final de seu estudo é similar à apresentada para o cálculo da velocidade de máxima produção e apresenta-se a seguir.

O custo total de fabricação é dado por:

$$K_p = (K_m + K_{mi}) + (K_{us} + K_{ui}) + K_{uf} + K_{um} + K_{eq} + K_{if} + K_v$$

onde: K_p = custo total de fabricação

K_m = custo de matéria prima

K_{mi} = custos indiretos de matéria prima (transporte, estocagem)

K_{us} = custo de mão-de-obra

K_{ui} = custos indiretos de usinagem

K_{uf} = custos de ferramentas

K_{um} = custos de máquinas (manutenção, depreciação)

K_{eq} = custo de controle de qualidade (programas, inspeções)

K_{if} = custo indireto de fabricação (fixos)

K_v = custo proporcional às variações de custos em operações anteriores

Para efeito de variações no custo total em função da velocidade de corte, que é nosso principal enfoque, descartaremos os custos K_m , K_{mi} , K_{ui} , K_{eq} , K_{if} e K_v , que são considerados custos fixos para o nosso estudo. Assim temos três custos principais, para os quais daremos maior atenção: K_{us} , K_{uf} e K_{um} . O equacionamento destas três variáveis pode ser descrito da seguinte forma, para cada peça usinada:

- Custo de mão-de-obra:

$$K_{us} = t_t \cdot \frac{S_h}{60}$$

onde: t_t = tempo total de confecção de cada peça

S_h = salário-hora de cada funcionário, no caso operador, em R\$/hora

Note que neste custo não estão inseridos os gastos com o funcionário além do salário, já que estes gastos também são fixos.

- Custos de ferramentas:

$$K_{uf} = \frac{1}{Z_t} \cdot K_{ft}$$

$$K_{ft} = \frac{1}{N_f} \cdot (V_{fi} - V_{ff}) + K_{fa} \cdot \frac{N_a}{N_f}$$

onde: Z_t = número de peças usinadas durante a vida T da ferramenta

K_{ft} = custo da ferramenta por vida T em R\$

N_f = número de vidas da ferramenta

V_{fi} = valor inicial da ferramenta em R\$

V_{ff} = valor final da ferramenta em R\$

K_{fa} = custo por afiação da ferramenta em R\$

N_a = número de afiações da ferramenta

Para ferramentas de insertos reversíveis:

$$K_{ft} = \frac{1}{N_{fp}} \cdot V_{si} + \frac{K_s}{N_s}$$

onde: N_{fp} = vida média do porta ferramentas em quantidade de fios de corte

V_{si} = custo de aquisição do porta ferramentas em R\$

K_s = custo de aquisição do inserto reversível em R\$

N_s = número de fios de corte do inserto reversível

- Custos de máquina:

$$K_{um} = \frac{t_t}{60} \cdot S_m$$

onde: S_m = salário máquina em R\$/hora, que pode ser traduzido nos custos envolvidos com a utilização da máquina (energia, espaço ocupado, manutenção, etc.)

Temos assim que o custo total de fabricação, levando-se em conta as parcelas variáveis, é:

$$K_p = K_1 + K_{us} + K_{uf} + K_{um}$$

onde: K_1 = somatória dos demais custos fixos

Substituindo cada parcela, temos:

$$K_p = K_1 + t_t \cdot \frac{S_h}{60} + \frac{t_t}{60} \cdot S_m + \frac{1}{Z_t} \cdot K_f$$

$$K_p = K_1 + \frac{t_t}{60} \cdot (S_h + S_m) + \frac{t_c}{T} \cdot K_f$$

Utilizando-se da fórmula de t_t calculada anteriormente:

$$t_t = t_c + t_1 + t_2 = t_c + t_1 + \left(\frac{t_c}{T} - \frac{1}{Z} \right) \cdot t_f$$

$$K_p = K_1 + \frac{t_c + t_1 + \left(\frac{t_c}{T} - \frac{1}{Z} \right) \cdot t_f}{60} \cdot (S_h + S_m) + \frac{t_c}{T} \cdot K_f$$

$$K_p = K_1 + \frac{t_c}{60} \cdot (S_h + S_m) + \frac{t_1}{60} \cdot (S_h + S_m) - \frac{t_f}{60 \cdot Z} \cdot (S_h + S_m) + \frac{t_c}{T} \left[K_f + \frac{t_f}{60} \cdot (S_h + S_m) \right]$$

Podemos reduzir a equação acima utilizando-se de três constantes, a fim de facilitar nossas contas:

$$C_1 = K_1 + \frac{t_1}{60} \cdot (S_h + S_m) - \frac{t_f}{60 \cdot Z} \cdot (S_h + S_m)$$

$$C_2 = (S_h + S_m)$$

$$C_3 = K_f + \frac{t_f}{60} \cdot (S_h + S_m)$$

Ficamos assim com:

$$K_p = C_1 + \frac{t_c}{60} \cdot C_2 + \frac{t_c}{T} \cdot C_3$$

Substituindo t_c para torneamento na equação acima:

$$K_p = C_1 + \frac{l_a \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot a \cdot V \cdot 60} \cdot C_2 + \frac{l_a \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot a \cdot V \cdot T} \cdot C_3$$

Novamente lançando mão da equação de Taylor, $T = \frac{K}{V^x}$, temos:

$$K_p = C_1 + \frac{l_a \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot a \cdot V \cdot 60} \cdot C_2 + \frac{l_a \cdot \pi \cdot d \cdot V^{(x-1)}}{1000 \cdot a \cdot K} \cdot C_3$$

O comportamento de cada parcela da soma de K_p se assemelha às curvas das parcelas de t_t , como pode ser visto na figura 8.

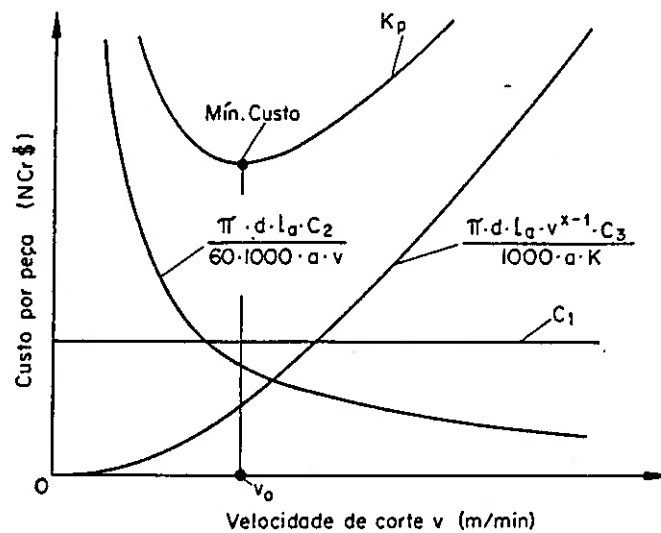


Figura 8 - Representação das diferentes parcelas de K_p em função da velocidade de corte.

Para calcular o valor da velocidade de mínimo custo devemos derivar o custo total em função da velocidade, analogamente ao que foi feito no cálculo da velocidade de máxima produção. Assim:

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

$$\frac{dK_p}{dv} = -\frac{l_a \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot a \cdot V_{mc}^2 \cdot 60} \cdot C_2 + (x-1) \frac{l_a \cdot \pi \cdot d \cdot V_{mc}^{(x-2)}}{1000 \cdot a \cdot K} \cdot C_3 = 0$$

$$-\frac{1}{V_{mc}^2 \cdot 60} \cdot C_2 + (x-1) \frac{V_{mc}^{(x-2)}}{K} \cdot C_3 = 0$$

$$V_{mc} = \sqrt[x]{\frac{C_2 \cdot K}{60 \cdot (x-1) \cdot C_3}}$$

onde: $C_2 = (S_h + S_m)$
referente aos custos com mão-de-obra e máquina
e

$$C_3 = K_f + \frac{t_f}{60} \cdot (S_h + S_m)$$

referente aos custos com ferramentas

Analogamente ao que foi calculado para a velocidade de máxima produção, o resultado aqui obtido vale também para a operação de faceamento.

$$V_{r_{mc}} = \sqrt[x]{\frac{C_2 \cdot K}{60 \cdot (x-1) \cdot C_3}}$$

Novamente podemos estender esta fórmula para o caso em que são utilizadas mais de uma ferramenta ou realizada mais de uma operação durante a usinagem da peça. Basta calcularmos a velocidade de mínimo custo para cada operação.

3. Análise de Sensibilidade

Devemos considerar para esta análise os parâmetros do processo de usinagem e os devidos tempos e custos que influenciam nos cálculos de forças, potências e velocidades de corte.

No cálculo da força de corte, as variáveis são o avanço e a profundidade de corte, o ângulo de posição da ferramenta e o material, que vai determinar a pressão específica de corte e o coeficiente z de Kienzle. Destas a maior influência provém do avanço e da profundidade de corte, e do ângulo de posição que determinará a espessura e largura da seção de corte.

A potência é influenciada apenas pela força de corte e da respectiva velocidade empregada, ou seja, depende indiretamente dos mesmos parâmetros utilizados nestas duas grandezas.

Por sua vez, a velocidade de máxima produção é função dos coeficientes K e x de Taylor e do tempo de troca de ferramenta por desgaste (t_R). Tais coeficientes variam com o V15, que depende do tipo e material da ferramenta e do avanço de corte.

Já a velocidade de mínimo custo envolve os custos com mão-de-obra e maquinário, os mesmo coeficientes de Taylor K e x , e os custos com ferramental. Este último engloba o custo de aquisição das ferramentas e sua vida.

4. Análise de Compatibilidade

Para estabelecer a interdependência entre máquina, ferramentas, material usinado, mão-de-obra e o método de análise adotado é preciso observar as variáveis de cada um destes fatores e sua influencia nos demais.

Com relação ao **torno** utilizado, as limitações impostas advém da potência máxima de corte fornecida pela máquina e do número limitado de rotações, dado o escalonamento de velocidades do equipamento.

A vida e a geometria são as restrições de processos que interferem no estudo por parte da **ferramenta**.

Para o **material**, podemos citar como fatores importantes, a dureza, e usinabilidade.

Os parâmetros de corte determinados pelas variáveis dos três fatores acima irão ditar quais serão os resultados do nosso estudo.

5. Análise de Estabilidade

De todos os parâmetros levantados até aqui, os que podem ser considerados mais instáveis são aqueles dependentes da usinagem, visto que há a possibilidade de se introduzir um novo equipamento para a fabricação das peças. No caso da utilização de um torno de comando numérico, poderíamos reavaliar a maioria dos parâmetros de usinagem, como profundidades de corte, novas velocidades e maiores potências no processo.

Em seguida, deve-se colocar as variáveis econômicas como o custo da hora de máquina, pois nos encontramos num período de escassez de energia e possível aumento em seus preços, e o custo de mão-de-obra, que seria um reflexo da utilização de trabalhadores mais especializados ou da automação do processo.

6. Levantamento dos Parâmetros do Processo

6.1. Material

Aço para trabalho a quente tipo ABNT H-13.

Código do fornecedor: VILLARES VH-13.

Composição química:

C = 0,40 %
Si = 1,00 %
Cr = 5,00 %
Mo = 1,50 %
V = 1,00 %

Similares: ASTM A 681 tipo H-13
AISI H-13
~DIN X 40 CrMoV 5 1 e

Estado de fornecimento: recozido com dureza máxima de 235 HB.

Dureza após têmpera e revenido: 490~550 HB.

Características gerais: aço cromo-molibdênio-vanádio para trabalho a quente com excelentes propriedades mecânicas em temperaturas elevadas, alta usinabilidade e grande estabilidade dimensional no tratamento térmico. É pouco sensível a choques térmicos que ocorrem em ferramentas refrigeradas a água.

Coeficiente de Kienzle: $1-z = 0,78$

Pressão específica de corte (segundo Kienzle): $K_s = 200 \text{ Kgf/mm}^2$.

6.2. Ferramentas

São utilizadas dois insertos intercambiáveis de 3 (três) arestas de corte de metal duro para todo o processo de usinagem. Um deles é utilizado para o desbaste e acabamento externo, e o outro para usinagens internas, como especificado abaixo:

	Formato	Ângulo de folga (α)	Comprimento da aresta de corte	Raio de Ponta
TMNG 160404	triângulo ($\varepsilon=60^\circ$)	0°	16,5 mm	0,4 mm
TPMR 110304	triângulo ($\varepsilon=60^\circ$)	11°	11,0 mm	0,4 mm

6.3. Máquina

Torno mecânico Xervitt mod. 1460 com 14 CV de potência e 16 velocidades escalonadas.

Rotações:

Baixa	30	48	80	140	240	350	575	1000
Alta	60	96	160	280	480	700	1150	2000

A seguir iremos apresentar os dados do processo de usinagem da matriz e do macho do molde de injeção.

6.4. Matriz

Op.	Descr.	Ferr.	p	a	l _a	n	d ₁	d ₂	V ₁₅
	(*)	(**)	(mm)	(mm/rev)	(mm)	(rpm)	(mm)	(mm)	(m/min)
1	Fd	1	2,30	0,5	88,9	350	177,8	0,0	150
2	Fa	1	0,20	0,1	88,9	700	177,8	0,0	330
3	D	1	2,70	0,5	40,0	350	177,8	172,4	150
4	A	1	0,20	0,1	40,0	700	172,4	172,0	330
5	Fd	1	2,30	0,5	88,9	350	177,8	0,0	150
6	Fa	1	0,20	0,1	88,9	700	177,8	0,0	330
7	D	1	2,90	0,5	40,0	350	177,8	172,0	150
8	D	1	3,00	0,5	70,0	350	172,0	166,0	150
9	A	1	1,00	0,1	70,0	575	166,0	164,0	270
10	Di	2	1,20	0,5	50,5	80	12,2	14,6	150
11	Ai	2	0,20	0,1	50,5	160	14,6	15,0	330
12	Fd	1	3,00	0,5	69,5	80	140,0	0,0	150
13	Fd	1	3,00	0,5	69,5	80	140,0	0,0	150
14	Fd	1	3,00	0,5	69,5	80	140,0	0,0	150
15	Fd	1	3,00	0,5	69,5	80	140,0	0,0	150
16	Fd	1	1,35	0,5	69,5	80	140,0	0,0	150
17	Fd	1	3,00	0,5	17,2	80	140,0	104,6	150
18	Fa	1	1,55	0,1	17,2	160	140,0	104,6	270
19	A	2	0,50	0,1	17,9	160	139,0	140,0	330
20	Fd	1	3,00	0,5	44,5	80	103,7	15,0	150
21	Fa	1	1,65	0,1	44,5	160	103,7	15,0	270

(*): D - Desbaste; A - Acabamento; Fd - Faceamento desbaste; Fa - Faceamento acabamento;

Di - Desbaste inclinado; Ai - Acabamento inclinado.

(**): Ferramentas: 1 - TNMG 160404; 2 - TPMR 110304.

6.5. Macho

Op.	Descr. (*)	Ferr. (**)	p (mm)	a (mm/rev)	l _a (mm)	n (rpm)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	V ₁₅ (m/min)
1	Fd	1	2,30	0,5	88,9	350	177,8	0,0	150
2	Fa	1	0,20	0,1	88,9	700	177,8	0,0	330
3	D	1	2,70	0,5	50,0	350	177,8	172,4	150
4	A	1	0,20	0,1	50,0	700	172,4	172,0	330
5	Fd	1	2,50	0,5	88,9	350	177,8	0,0	150
6	Fd	1	2,50	0,5	88,9	350	177,8	0,0	150
7	Fa	1	0,30	0,1	88,9	700	177,8	0,0	330
8	D	1	2,90	0,5	47,2	350	177,8	172,0	150
9	D	1	3,00	0,5	87,2	350	172,0	166,0	150
10	A	1	1,00	0,1	87,2	700	166,0	164,0	270
11	D	1	3,00	0,5	62,3	80	182,4	176,4	150
12	D	1	3,00	0,5	62,3	80	176,4	170,4	150
13	D	1	3,00	0,5	62,3	80	170,4	164,4	150
14	D	1	3,00	0,5	62,3	80	164,4	158,4	150
15	D	1	3,00	0,5	62,3	80	158,4	152,4	150
16	D	1	3,00	0,5	62,3	80	152,4	146,4	150
17	D	1	3,00	0,5	62,3	80	146,4	140,4	150
18	D	1	3,00	0,5	62,3	80	140,4	134,4	150
19	D	1	3,00	0,5	62,3	80	134,4	128,4	150
20	D	1	3,00	0,5	62,3	80	128,4	122,4	150
21	D	1	3,00	0,5	62,3	80	122,4	116,4	150
22	D	1	2,65	0,5	62,3	80	116,4	111,1	150
23	D	1	3,00	0,5	26,3	80	111,1	105,1	150
24	D	1	3,00	0,5	26,3	80	105,1	99,1	150
25	D	1	3,00	0,5	26,3	80	99,1	93,1	150
26	D	1	3,00	0,5	26,3	80	93,1	87,1	150
27	D	1	3,00	0,5	26,3	80	87,1	81,1	150
28	D	1	3,00	0,5	26,3	80	81,1	75,1	150
29	D	1	3,00	0,5	26,3	80	75,1	69,1	150

Op.	Descr.	Ferr.	p	a	l _a	n	d ₁	d ₂	V ₁₅
	(*)	(**)	(mm)	(mm/rev)	(mm)	(rpm)	(mm)	(mm)	(m/min)
30	D	1	3,00	0,5	26,3	80	69,1	63,1	150
31	D	1	3,00	0,5	26,3	80	63,1	57,1	150
32	D	1	3,00	0,5	26,3	80	57,1	51,1	150
33	D	1	3,00	0,5	26,3	80	51,1	45,1	150
34	D	1	3,00	0,5	26,3	80	45,1	39,1	150
35	D	1	3,00	0,5	26,3	80	39,1	33,1	150
36	D	1	3,00	0,5	26,3	80	33,1	27,1	150
37	D	1	3,00	0,5	26,3	80	27,1	21,1	150
38	D	1	2,20	0,5	26,3	80	21,1	16,7	150
39	Di	1	3,00	0,5	32,65	80	111,1	105,1	150
40	Ai	1	2,75	0,1	32,65	160	105,1	99,6	270
41	Ai	1	0,25	0,1	12,0	160	99,6	99,1	330
42	Di	1	3,00	0,5	26,3	80	16,7	10,7	150
43	Ai	1	0,25	0,1	26,3	160	10,7	10,2	330
44	Fd	2	1,00	0,1	5,1	80	10,2	0,0	270
45	Fd	2	1,00	0,1	5,1	80	10,2	0,0	270
46	Fd	2	1,00	0,1	5,1	80	10,2	0,0	270
47	Fa	2	0,60	0,1	5,1	80	10,2	0,0	330
48	Fd	1	1,50	0,1	49,55	160	99,1	16,55	270
49	Fd	1	1,50	0,1	49,55	160	99,1	16,55	270
50	Fa	1	0,35	0,1	49,55	160	99,1	16,55	330

(*): D - Desbaste; A - Acabamento; Fd - Faceamento desbaste; Fa - Faceamento acabamento;

Di - Desbaste inclinado; Ai - Acabamento inclinado.

(**): Ferramentas: 1 - TNMG 160404; 2 - TPMR 110304.

Note que os diâmetros d_1 e d_2 para a usinagem de perfis se referem aos diâmetros inicial e final de cada passe e l_a é o percurso usinado na direção de avanço. Já no caso de operações de faceamento d_1 e d_2 são os diâmetros inicial e final de percurso, determinando o comprimento l_a .

Os cálculos referentes aos desbastes e acabamentos inclinados serão efetuados do mesmo modo que os demais cálculos, levando-se em conta que os ângulos de inclinação são muito pequenos, não influenciando consideravelmente nos resultados. No levantamento de dados, os parâmetros de corte para estas operações foram adequados de modo a aproximá-los a parâmetros de usinagem de perfis paralelos ao eixo.

7. Tratamento dos Dados do Projeto

Nesta etapa serão efetuados os cálculos de velocidades de máxima produção e mínimo custo para cada operação, verificações das potências requeridas, além das possíveis reduções de tempos e custos de fabricação das peças. Para tanto foram elaboradas planilhas de cálculo, tanto para usinagens de perfil como para faceamentos. Apresentaremos primeiramente os memoriais de cálculo para as velocidade de cada tipo de operação, e posteriormente para o cálculo da potência requerida e das reduções de tempo e custo de fabricação. Finalmente mostraremos uma tabela com todos os resultados obtidos.

7.1. Memoriais de Cálculo

Para exemplificar os cálculos mostraremos o memorial de cálculo para algumas operações da usinagem da matriz.

Velocidades para Faceamento - Operação 1:

Dados:

$$C_2 \text{ (por hora)} = \text{R\$ } 17,05$$

$$\text{Avanço (a)} = 0,5 \text{ mm/rev}$$

$$\text{Profundidade (p)} = 2,3 \text{ mm}$$

$$V_{15} = 150 \text{ m/min}$$

$$C_a = 93 \text{ (tabelado - ASTM)}$$

$$K_s = \text{R\$ } 7,02$$

$$t_f = 2,5 \text{ min}$$

$$d_1 = 177,8 \text{ mm}$$

$$d_2 = 0 \text{ mm}$$

Dureza Brinell (kg*/mm²)	Usinagem de aço					Usinagem de ferro fundido			
	Metal duro			Aço rápido		Metal duro		Aço rápido	
	Alto grau	Médio grau	Tipos antigos	Sêco	Com fluido	Nodular	Cin-zento	Sêco	Com fluido
100	302	228	122	65	91	—	20,2	4,0	5,7
125	225	170	90	49	67	—	17,2	3,2	4,5
150	178	135	71	37	52	—	13,6	2,8	3,9
175	152	114	60	32	45	19	10,7	2,5	3,5
200	125	93	50	26	37	10,7	8,6	2,0	2,9
225	115	80	42	22	32	7,7	6,8	1,7	2,2
250	93	69	37	21	28	6,0	5,1	—	—
275	80	62	32	17	24	5,6	3,9	—	—
300	73	54	30	16	22	5,6	—	—	—

Valores de Ca para uma vida de ferramenta de 60 min, segundo a ASTM.

Cálculos:

$$V_{60} = \frac{C_a}{a^x \cdot p^y} = \frac{93}{0,5^{0,42} \cdot 2,3^{0,14}} = 110,7$$

Da equação de Taylor:

$$15 \cdot V_{15}^x = 60 \cdot V_{60}^x$$

$$\frac{15}{60} = \left(\frac{110,7}{150} \right)^x$$

$$\log(0,25) = x \cdot \log(0,738)$$

$$x = 4,57$$

$$K = T \cdot V^x = 15 \cdot 150^{4,57} = 132 \cdot 10^9$$

$$V_{fmp} = \sqrt[x]{\frac{K}{(x-1) \cdot t_R}} = \sqrt[4,57]{\frac{132 \cdot 10^9}{(4,57-1) \cdot 2,5}} = 168,1 \text{ m/min}$$

$$D_x = \left[\frac{1 - \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{x+1}}{(x+1) \cdot \left(1 - \frac{d_2}{d_1} \right)} \right]^{\frac{1}{x}} = \left[\frac{1 - \left(\frac{0}{177,8} \right)^{4,57+1}}{(4,57+1) \cdot \left(1 - \frac{0}{177,8} \right)} \right]^{\frac{1}{4,57}} = 0,687$$

$$n_{r_{mp}} = \frac{1000 \cdot V_{r_{mp}}}{\pi \cdot d_1 \cdot D_x} = \frac{1000 \cdot 168,1}{\pi \cdot 177,8 \cdot 0,687} = 438,2 \text{ rpm}$$

$$K_{ft} = \frac{1}{N_{fp}} \cdot V_{si} + \frac{K_s}{N_s} = \frac{7,02}{3} = 2,34$$

$$C_3 = K_{ft} + \frac{t_{ft}}{60} \cdot (S_h + S_m) = 2,34 + \frac{2,5}{60} \cdot 17,05 = 3,05$$

$$V_{r_{mc}} = \sqrt[4]{\frac{C_2 \cdot K}{60 \cdot (x-1) \cdot C_3}} = \sqrt[4]{\frac{17,05 \cdot 132 \cdot 10^9}{60 \cdot (4,57-1) \cdot 3,05}} = 122,2 \text{ m/min}$$

$$n_{r_{mc}} = \frac{1000 \cdot V_{r_{mc}}}{\pi \cdot d_1 \cdot D_x} = \frac{1000 \cdot 122,2}{\pi \cdot 177,8 \cdot 0,687} = 318,5 \text{ rpm}$$

Velocidades para Torneamento - Operação 3:

Dados:

C_2 (por hora) = R\$ 17,05

Avanço (a) = 0,5 mm/rev

Profundidade (p) = 2,7 mm

$V_{15} = 150 \text{ m/min}$

$C_a = 93$ (tabelado - ASTM)

$K_s = \text{R\$ } 7,02$

$t_{ft} = 2,5 \text{ min}$

$d = 177,8 \text{ mm}$

Cálculos:

$$V_{60} = \frac{C_a}{a^x \cdot p^y} = \frac{93}{0,5^{0,42} \cdot 2,7^{0,14}} = 108,3$$

Da equação de Taylor:

$$15 \cdot V_{15}^x = 60 \cdot V_{60}^x$$

$$\frac{15}{60} = \left(\frac{108,3}{150} \right)^x$$

$$\log(0,25) = x \cdot \log(0,722)$$

$$x = 4,25$$

$$K = T \cdot V^x = 15 \cdot 150^{4,25} = 27 \cdot 10^9$$

$$V_{mp} = \sqrt[x]{\frac{K}{(x-1) \cdot t_{ft}}} = \sqrt[4,25]{\frac{27 \cdot 10^9}{(4,25-1) \cdot 2,5}} = 173,2 \text{ m/min}$$

$$n_{mp} = \frac{1000 \cdot V_{mp}}{\pi \cdot d} = \frac{1000 \cdot 173,2}{\pi \cdot 177,8} = 310,1 \text{ rpm}$$

$$K_{ft} = \frac{1}{N_{fp}} \cdot V_{si} + \frac{K_s}{N_s} = \frac{7,02}{3} = 2,34$$

$$C_3 = K_{ft} + \frac{t_{ft}}{60} \cdot (S_h + S_m) = 2,34 + \frac{2,5}{60} \cdot 17,05 = 3,05$$

$$V_{mc} = \sqrt[x]{\frac{C_2 \cdot K}{60 \cdot (x-1) \cdot C_3}} = \sqrt[4,25]{\frac{17,05 \cdot 27 \cdot 10^9}{60 \cdot (4,25-1) \cdot 3,05}} = 123,0 \text{ m/min}$$

$$n_{mc} = \frac{1000 \cdot V_{mc}}{\pi \cdot d} = \frac{1000 \cdot 123,0}{\pi \cdot 177,8} = 220,2 \text{ rpm}$$

Cálculo de Potência - Operação 1:

Dados:

$K_{s1,1} = 200 \text{ Kgf/mm}^2$ (estimado para o nosso material ABNT H-13)

$z = 0,22$ (também estimado)

Avanço (a) = 0,5 mm/rev

Profundidade (p) = 2,3 mm

ângulo $\chi = 90$ graus

Velocidade = 168,1 m/min (máxima produção)

Cálculos:

$$h = a \cdot \text{sen}(\chi) = 0,50 \text{ mm}$$

$$b = p / \text{sen}(\chi) = 2,30 \text{ mm}$$

$$F = b \cdot h^{(1-z)} \cdot K_{s1,1} = 267,89 \text{ Kgf}$$

$$N = \frac{F \cdot V}{60 \cdot 75} = 10,01 \text{ CV}$$

Nos casos em que a potência requerida foi maior do que a disponível foi utilizada a maior velocidade ou rotação possível, de acordo com a força de corte.

Redução de Tempo e Custos - Operação 2:

Para esta etapa foram propostas novas velocidades e rotações para o processo, levando-se em conta o escalonamento de rotações e a potência disponíveis no torno.

Dados (alguns previamente calculados):

n (atual): 700 rpm

n (proposto): 575 rpm

V (atual): 299,6 m/min

V (proposto): 246,1 m/min

d (equivalente) = $d_1 \cdot D_x$: 136,2 mm

l_a : 88,9 mm

a : 0,2 mm/rot

K : 4,58E+21

t_f : 2,5 min

x : 8,43

C_2 : R\$ 17,05

C_3 : R\$ 3,05

Cálculos:

Redução de tempo de usinagem:

Considerando os tempos variáveis com a rotação:

$$t_t = t_c + \frac{t_c}{T} \cdot t_f = t_c + \frac{t_c \cdot V^x}{K} \cdot t_f$$

$$t_c = \frac{l_a}{a \cdot n}$$

Devemos calcular os tempos para a situação atual e a proposta:

t_c (atual) = 0,635 min

t_c (proposto) = 0,773 min

t_t (atual) = 0,889 min

t_t (proposto) = 0,832 min

Teremos portanto uma redução de **0,057** min para cada peça, nesta operação.

Analogamente ao que foi feito para os tempos, temos:

$$K_p = \frac{t_c}{60} \cdot C_2 + \frac{t_c}{T} \cdot C_3 = \frac{t_c}{60} \cdot C_2 + \frac{t_c \cdot V^x}{K} \cdot C_3$$

K_p (atual) = 0,491 reais

K_p (proposto) = 0,292 reais

Diferença = **0,199** reais (para cada peça, nesta operação).

7.2. Resultados Obtidos

7.2.1. Matriz:

Op.	n	V _{mp}	V _{mc}	n _{mp}	n _{mc}	N	Mínimo Custo		Máxima Produção	
							n (prop.)	Δ\$	n (prop.)	Δt
	(rpm)	(m/min)	(m/min)	(rpm)	(rpm)	(CV)	(rpm)	(Reais)	(rpm)	(min)
1	350	168,1	122,2	438,2	318,5	10,01	350	0,000	350	0,000
2	700	311,5	288,1	653,9	604,9	0,46	575	0,225	700	0,000
3	350	173,2	123,0	310,1	220,2	12,11	240	0,072	280	0,004
4	700	311,5	288,1	575,0	532,0	0,46	575	1,476	575	1,115
5	350	168,1	122,2	438,2	318,5	10,01	350	0,000	350	0,000
6	700	311,5	288,1	653,9	604,9	0,46	575	0,225	700	0,000
7	350	175,7	123,4	314,5	220,9	13,19	240	0,066	280	0,000
8	350	176,9	123,6	327,3	228,8	13,73	240	0,091	280	-0,015
9	575	255,5	230,3	489,9	441,6	1,88	480	0,909	480	0,560
10	80	151,9	124,2	3311,8	2707,8	4,72	160	0,179	160	0,631
11	160	311,5	290,3	6609,2	6161,0	0,46	160	0,000	160	0,000
12	80	176,9	123,6	599,3	418,9	13,73	160	0,245	160	0,868
13	80	176,9	123,6	599,3	418,9	13,73	160	0,245	160	0,868
14	80	176,9	123,6	599,3	418,9	13,73	160	0,245	160	0,868
15	80	176,9	123,6	599,3	418,9	13,73	160	0,245	160	0,868
16	80	154,3	121,3	484,4	380,8	5,39	160	0,247	160	0,869
17	80	176,9	123,6	455,5	318,4	13,73	160	0,060	160	0,214
18	160	262,5	221,8	666,4	563,2	3,00	160	0,000	160	0,000
19	160	331,2	273,4	753,1	621,6	1,22	160	0,000	160	0,000
20	80	176,9	123,6	778,6	544,2	13,73	160	0,158	160	0,556
21	160	264,0	221,1	1042,1	872,6	3,21	160	0,000	160	0,000

Nas quatro últimas colunas foram propostas duas rotações para cada operação, uma visando minimizar o custo e outra visando minimizar o tempo de fabricação. Para o primeiro caso podemos ver a redução de custo de cada operação por peça. Para o segundo caso temos a redução de tempo de usinagem de cada operação por peça.

Nos casos em que não haviam rotações escalonadas que se encontravam dentro do intervalo de máxima eficiência foram propostas as rotações mais próximas, como foi o caso da operação número 2.

Na tabela a seguir podemos ver a redução percentual de custo e tempo para as rotações sugeridas.

	Mínimo Custo	Máxima Produção
	\$ (Reais)	t (min)
Redução:	4,690	7,404
Total:	11,221	29,007
Porcentagem:	41,80%	25,52%

7.2.2. Macho

Op.	n	Vmp	Vmc	nmp	nmc	N	Mínimo Custo		Máxima Produção	
							n (prop.)	Δ\$	n (prop.)	Δt
	(rpm)	(m/min)	(m/min)	(rpm)	(rpm)	(CV)	(rpm)	(Reais)	(rpm)	(min)
1	350	168,1	122,2	438,2	318,5	10,01	350	0,000	350	0,000
2	700	311,5	288,1	653,9	604,9	0,46	575	0,225	700	0,000
3	350	173,2	123,0	310,1	220,2	12,11	240	0,090	280	0,004
4	700	311,5	288,1	575,0	532,0	0,46	575	1,846	575	1,393
5	350	170,7	122,6	448,4	321,9	11,05	350	0,000	350	0,000
6	350	170,7	122,6	448,4	321,9	11,05	350	0,000	350	0,000
7	700	315,7	275,1	712,3	620,7	0,70	700	0,000	700	0,000
8	350	175,7	123,4	314,5	220,9	13,19	240	0,078	280	0,000
9	350	176,9	123,6	327,3	228,8	13,73	240	0,114	280	-0,019
10	575	255,5	230,3	489,9	441,6	1,88	480	1,132	480	0,698
11	80	176,9	123,6	308,7	215,7	13,73	160	0,202	160	0,763
12	80	176,9	123,6	319,2	223,1	13,73	160	0,205	160	0,765
13	80	176,9	123,6	330,4	230,9	13,73	160	0,207	160	0,767
14	80	176,9	123,6	342,5	239,4	13,73	160	0,209	160	0,769
15	80	176,9	123,6	355,4	248,4	13,73	160	0,211	160	0,770
16	80	176,9	123,6	369,4	258,2	13,73	160	0,212	160	0,771
17	80	176,9	123,6	384,6	268,8	13,73	160	0,214	160	0,772
18	80	176,9	123,6	401,0	280,3	13,73	160	0,215	160	0,773
19	80	176,9	123,6	418,9	292,8	13,73	160	0,216	160	0,774

Op.	n	Vmp	Vmc	nmp	nmc	N	Mínimo Custo		Máxima Produção	
							n (prop.)	Δ\$	n (prop.)	Δt
	(rpm)	(m/min)	(m/min)	(rpm)	(rpm)	(CV)	(rpm)	(Reais)	(rpm)	(min)
20	80	176,9	123,6	438,5	306,5	13,73	160	0,217	160	0,775
21	80	176,9	123,6	460,0	321,5	13,73	160	0,218	160	0,776
22	80	172,6	122,9	472,0	336,0	11,84	160	0,219	160	0,777
23	80	176,9	123,6	506,8	354,2	13,73	160	0,092	160	0,328
24	80	176,9	123,6	535,7	374,4	13,73	160	0,093	160	0,328
25	80	176,9	123,6	568,1	397,1	13,73	160	0,093	160	0,328
26	80	176,9	123,6	604,7	422,7	13,73	160	0,093	160	0,328
27	80	176,9	123,6	646,4	451,8	13,73	160	0,093	160	0,328
28	80	176,9	123,6	694,2	485,2	13,73	160	0,093	160	0,329
29	80	176,9	123,6	749,7	524,0	13,73	160	0,093	160	0,329
30	80	176,9	123,6	814,8	569,5	13,73	160	0,093	160	0,329
31	80	176,9	123,6	892,2	623,7	13,73	160	0,093	160	0,329
32	80	176,9	123,6	986,0	689,2	13,73	160	0,093	160	0,329
33	80	176,9	123,6	1101,8	770,1	13,73	160	0,093	160	0,329
34	80	176,9	123,6	1248,3	872,6	13,73	160	0,093	160	0,329
35	80	176,9	123,6	1439,9	1006,5	13,73	160	0,093	160	0,329
36	80	176,9	123,6	1700,9	1188,9	13,73	160	0,093	160	0,329
37	80	176,9	123,6	2077,5	1452,1	13,73	160	0,093	160	0,329
38	80	166,7	122,0	2515,5	1840,4	9,49	160	0,093	160	0,329
39	80	176,9	123,6	506,8	354,2	13,73	160	0,115	160	0,407
40	160	281,0	218,2	851,0	661,0	5,70	160	0,000	160	0,000
41	160	312,8	280,0	999,5	894,8	0,58	160	0,000	160	0,000
42	80	176,9	123,6	3371,3	2356,4	13,73	160	0,093	160	0,329
43	160	312,8	280,0	9303,9	8328,9	0,58	160	0,000	160	0,000
44	80	255,5	232,7	9670,5	8806,5	1,88	160	0,091	160	0,319
45	80	255,5	232,7	9670,5	8806,5	1,88	160	0,091	160	0,319
46	80	255,5	232,7	9670,5	8806,5	1,88	160	0,091	160	0,319
47	80	259,0	252,4	8734,3	8511,8	1,15	160	0,091	160	0,319
48	160	261,7	222,3	1065,4	904,7	2,90	160	0,000	160	0,000
49	160	261,7	222,3	1065,4	904,7	2,90	160	0,000	160	0,000
50	160	319,3	272,0	1296,2	1104,3	0,82	160	0,000	160	0,000

	Mínimo Custo	Máxima Produção
	\$ (Reais)	t (min)
Redução:	8,089	18,597
Total:	19,979	58,033
Porcentagem:	40,49%	32,05%

8. Conclusão

De acordo com os resultados mostrados na seção anterior, pudemos tirar as seguintes conclusões sobre o objetivo deste trabalho que é o estudo de otimização.

Encaixando o processo de usinagem atual nos moldes teóricos do intervalo de máxima eficiência, conseguimos chegar a novas condições de usinagem para mínimo custo e máxima produção. Analisando os valores finais podemos observar que a redução total de custo por peça, no caso da matriz e do macho, gira em torno de 40%, se considerarmos apenas os custos variáveis com a velocidade de corte. Isto representa R\$ 12,78 somando-se as duas peças, que no final do mês atendendo a uma produção de 20 peças/mês, equivale a uma economia anual de aproximadamente R\$ 3000,00. No caso de máxima produção, a redução é de 30% sobre o tempo de usinagem atual, representando uma redução de 26 minutos por peça. Apesar destes valores de redução percentuais serem animadores, eles devem ser olhados com ressalva, pois eles influenciam apenas no tempo efetivo de corte, que é aproximadamente apenas 40% do tempo total de confecção da peça.

No entanto, durante o processo de otimização nem sempre foi possível adequar as velocidades de corte ao intervalo de máxima eficiência, devido a dois fatores principais. O primeiro fator refere-se a limitações no escalonamento de rotações do torno, que nos obrigou, por muitas vezes, a propor velocidades fora do intervalo de máxima eficiência. Para contornar esta situação a saída seria investir em novos equipamentos com tecnologias mais recentes, como tornos de comando numérico.

O segundo diz respeito às limitações de velocidades impostas pelo projeto da peça, uma vez que sua excentricidade não permite altas rotações na usinagem. Neste caso podemos sugerir uma mudança de projeto na peça, reduzindo ao máximo esta excentricidade e permitindo a utilização de velocidades mais convenientes, ou seja, mais próximos do intervalo de máxima eficiência. Uma breve análise comprovou que esta modificação reduziria em 66,36% (58 minutos) o tempo de usinagem, ou traria uma economia de 66,28% (R\$ 20,68) sobre o processo atual. Outra alternativa mais imediata seria a utilização de artifícios na usinagem como a colocação de um contrapeso, que eliminaria as forças radiais causadas pela excentricidade

Além das vantagens relacionadas diretamente com a teoria desenvolvida, podemos citar a racionalização do potencial fabril, que significa melhorias na produtividade per capita e maior disponibilidade de mão-de-obra, e o melhor aproveitamento dos recursos energéticos.

Há a possibilidade de aplicarmos esta otimização para peças usinadas que hoje são produzidas em série, conseguindo diminuir o tempo de fabricação e aumentar o padrão de produção de peças por hora. Ganha-se também com a qualidade do produto final e a diminuição do índice de refugo, graças à padronização do processo de usinagem.

Este estudo pode ainda ser aplicado na confecção dos moldes para as peças de novos produtos, que diminuiria seu custo final.

Finalmente, seguindo uma tendência mundial de globalização da economia, que acirra a concorrência de mercado e obriga as empresas a reduzir cada vez mais seus gastos para diminuir o preço final, todo este processo de otimização elaborado neste trabalho é de grande valia àqueles que se virem forçados a se enquadrar nesta nova filosofia.

9. Bibliografia

Ferraresi, Dino - "Usinagem dos Metais - Volume 1: Fundamentos da Usinagem dos Metais", Editora Edgard Blücher, 1970.

Chiaverini, Vicente - "Tecnologia Mecânica - Volume 1: Estrutura e Propriedades, Processos de Fabricação", Editora McGraw-Hill, 1977.

Doyle, Lawrence E. - "Processos de Fabricação e Materiais para Engenheiros", Editora Edgard Blücher, 1962.

Madureira, Omar M. - Apostila do curso PMC-475 - Metodologia do Projeto.

Stipkovic Filho, Marco - "USINAGEM" - Apostila do curso PMC-584 - Máquinas de Fabricação I.

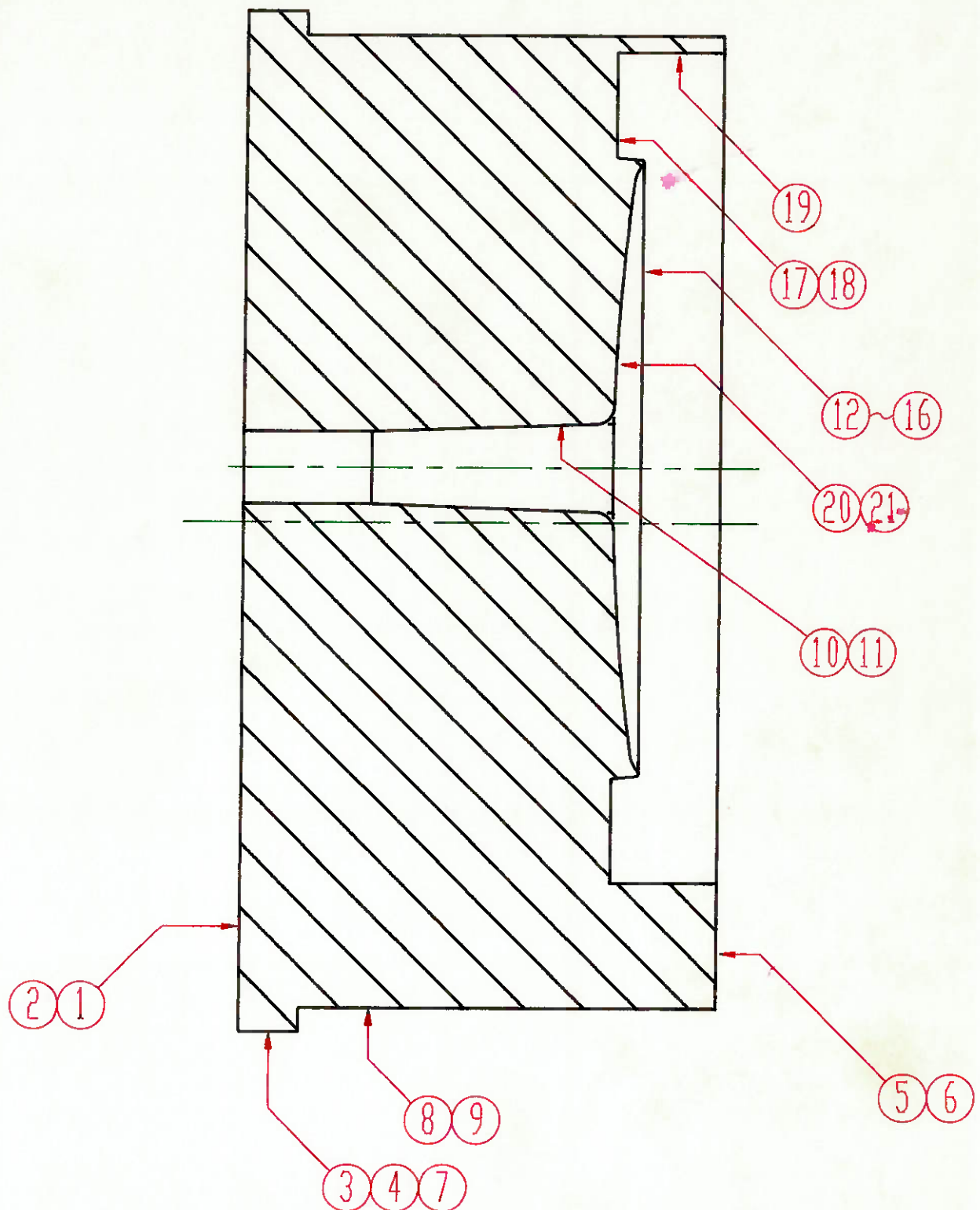
10. Apêndices

10.1. Apêndice A - Índice de Variáveis Utilizadas Neste Trabalho

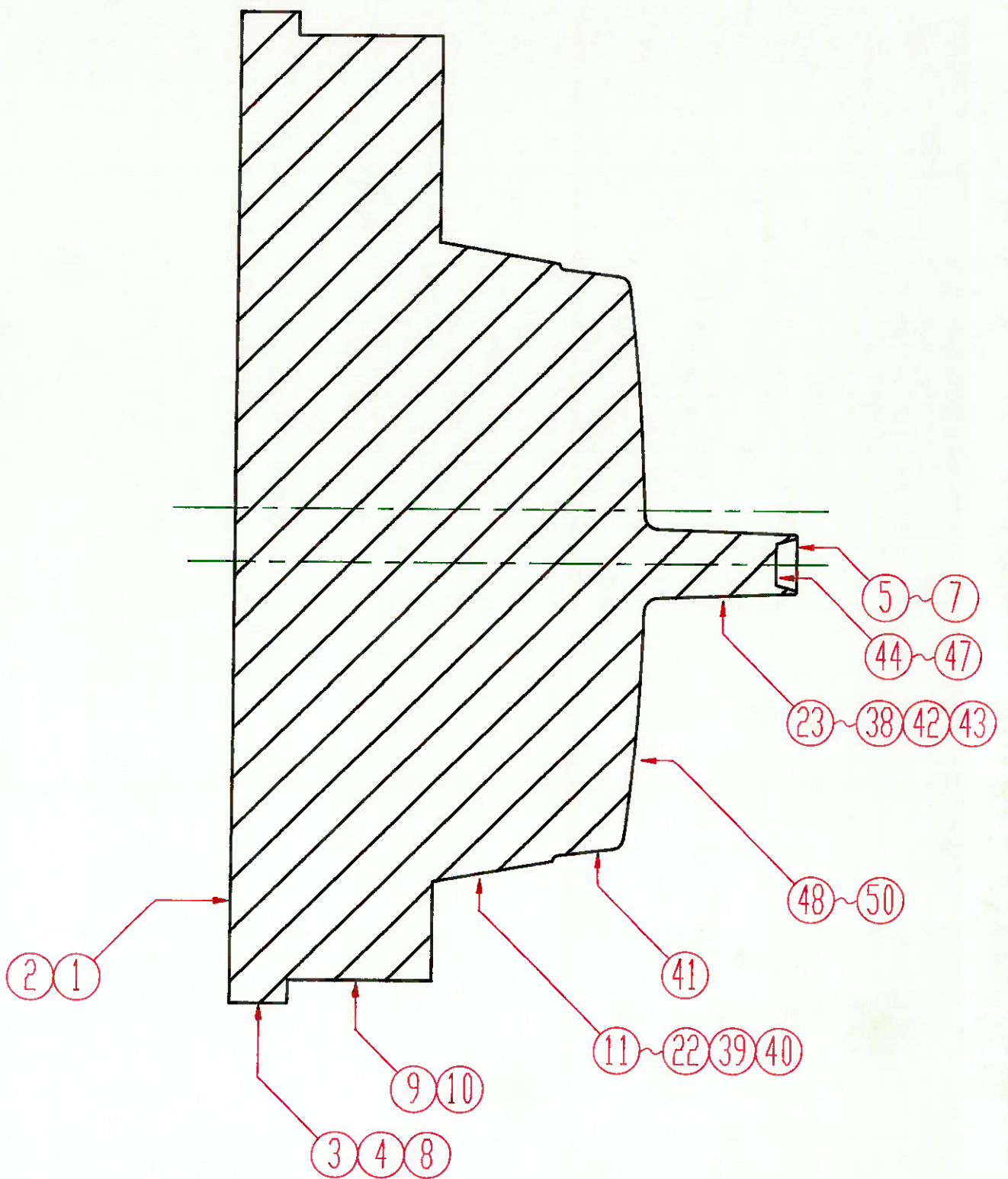
a = avanço de corte em mm/rev
 b = largura do cavaco em mm
 C_1 = constante de custo independente da velocidade de corte, em R\$/peça
 C_2 = soma das despesas totais de mão-de-obra e salário máquina, em R\$/hora
 C_3 = constante de custo relativo à ferramenta, em R\$
 C_a = constante em função da dureza BRINELL do material usinado
 d = diâmetro da seção usinada em mm
 d_1 = diâmetro externo de faceamento em mm
 d_2 = diâmetro interno de faceamento em mm
 D_x = variável auxiliar para cálculo de V_r
 F = força principal de corte em Kgf
 h = espessura do cavaco em mm
 K = constante do processo (Taylor)
 K_1 = somatória dos custos fixos
 K_{eq} = custo de controle de qualidade (programas, inspeções)
 K_{fa} = custo por afiação da ferramenta em R\$
 K_{ft} = custo da ferramenta por vida T em R\$
 K_{if} = custo indireto de fabricação (fixos)
 K_m = custo de matéria prima
 K_{mi} = custos indiretos de matéria prima (transporte, estocagem)
 K_p = custo total de fabricação
 $K_s (1)$ = pressão específica de corte em Kgf/mm²
 $K_s (2)$ = custo de aquisição do inserto reversível em R\$
 $K_{s1,1}$ = força de corte necessária para retirada de um cavaco de 1 mm de largura por 1 mm de espessura para um dado material
 K_{uf} = custos de ferramentas
 K_{ui} = custos indiretos de usinagem
 K_{um} = custos de máquinas (manutenção, depreciação)
 K_{us} = custo de mão-de-obra
 K_v = custo proporcional às variações de custos em operações anteriores
 l_a = comprimento da seção usinada em mm
 N = potência de corte em CV
 $n (1)$ = expoente experimental de Taylor em função do par ferramenta-material usinado
 $n (2)$ = rotação em rpm
 N_a = número de afiações da ferramenta
 N_f = número de vidas da ferramenta
 N_{fp} = vida média do porta ferramentas em quantidade de fios de corte
 N_s = número de fios de corte do inserto reversível
 n_t = número de trocas de ferramentas no lote Z
 p = profundidade de corte em mm
 S = seção do cavaco em mm²
 S_h = salário-hora de cada funcionário, no caso operador, em R\$/hora
 S_m = salário máquina em R\$/hora, que pode ser traduzido nos custos envolvidos com a utilização da máquina (energia, espaço ocupado, manutenção, etc.)
 T = tempo de vida da ferramenta (para cada afiação) ou de usinagem
 t_1 = tempo secundário de t_t
 t_2 = tempo de ferramental de t_t
 t_a = tempo de posicionamento da ferramenta (aproximação e afastamento)
 t_c = tempo efetivo de corte
 t_{fa} = tempo de afiação da ferramenta

t_{ft} = tempo de troca da ferramenta por desgaste
 t_p = tempo de preparação ou setup da máquina
 t_{pi} = tempo de preparação para cada peça
 t_s = tempo secundário para posicionamento e retirada de cada peça
 t_t = tempo total de confecção de cada peça
 V = velocidade de corte em m/min
 V_{60} = velocidade para que a ferramenta tenha uma vida de 60 minutos
 V_{fi} = valor inicial da ferramenta em R\$
 V_{ff} = valor final da ferramenta em R\$
 V_{mc} = velocidade de mínimo custo
 V_{mp} = velocidade de máxima produção
 V_r = velocidade equivalente para faceamento
 $V_{r_{mc}}$ = velocidade de mínimo custo para faceamento
 $V_{r_{mp}}$ = velocidade de máxima produção para faceamento
 V_{si} = custo de aquisição do porta ferramentas em R\$
 x (1) = expoente experimental em função do material usinado (para o aço temos $x=0,42$)
 x (2) = expoente experimental de Taylor em função do par ferramenta-material usinado = $1/n$
 y = expoente experimental em função do material usinado (para o aço temos $y=0,14$)
 Z = número de peças no lote
 z = constante característica do material (Kienzle)
 Z_t = número de peças usinadas durante a vida T da ferramenta
 χ = ângulo de posição da ferramenta
 ΔT = tempo de usinagem de faceamento

10.2. Apêndice B - Desenhos



MATRIZ
Operacoes de usinagem
ESCALA 1:1



MACHO
Operacoes de usinagem

ESCALA 1:1



ESCALA 1:1