

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
E DE MATERIAIS - PPGEM**

**MAURICIO IWAMA TAKANO**

**OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE UMA CÉLULA FLEXÍVEL DE  
MANUFATURA COM TORNO E FRESADORA CNC**

**DISSERTAÇÃO**

**CURITIBA**

**2010**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**MAURICIO IWAMA TAKANO**

**OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE UMA CÉLULA  
FLEXÍVEL DE MANUFATURA COM TORNO E  
FRESADORA CNC**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Área de Concentração em Engenharia da Manufatura, do Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação, do Campus de Curitiba, da UTFPR.

**Orientador:** Prof. Luiz Carlos de Abreu Rodrigues, Dr. Eng.

**CURITIBA  
SETEMBRO - 2010**

## TERMO DE APROVAÇÃO

MAURICIO IWAMA TAKANO

# OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE UMA CÉLULA FLEXÍVEL DE MANUFATURA COM TORNO E FRESADORA CNC

Esta Dissertação foi julgada para a obtenção do título de mestre em engenharia, área de concentração em engenharia da manufatura, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais.

---

Prof. Giuseppe Pintaude, Dr. Eng.  
Coordenador de Curso

### Banca Examinadora

---

Prof. Luiz Carlos de Abreu Rodrigues,  
Dr. Eng.  
(UTFPR)

---

Prof. Leandro Magatão, Dr. Eng.  
(UTFPR)

---

Prof. Guilherme Ernani Vieira, Dr. Eng.  
(PUC)

---

Prof. Milton Luiz Polli, Dr. Eng.  
(UTFPR)

Curitiba, 15 de Setembro de 2010

Dedico este trabalho a meu pai.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família que me deu toda estrutura e suporte para que eu pudesse estar aqui realizando este trabalho, tanto espiritual como também financeiramente. Um agradecimento especial ao meu pai que sempre foi meu maior exemplo de um grande homem e que infelizmente não pôde acompanhar esse passo importantíssimo em minha vida. Por isso, dedico esse trabalho a ele.

Aos meus colegas, pelo grande apoio e paciência, me incentivando nos estudos não me deixando desviar de meus objetivos e sempre compreendendo quando me ausentava para realizar minhas pesquisas e trabalhos.

Ao meu orientador pelo enorme auxílio nos estudos e no conhecimento, pela sua grande paciência para me orientar sempre que me encontrei perdido e por compartilhar de seus conhecimentos para que eu pudesse crescer e desenvolver este trabalho da melhor forma que pude.

À instituição pelo grande suporte dado ao disponibilizar todos seus laboratórios e ferramentas que necessitei durante a execução do trabalho e também pelo apoio intelectual de todos os professores que sempre estiveram presentes durante todo o processo deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por acreditar em minha capacidade de desenvolvimento e criação e também pelo auxílio financeiro para que eu pudesse me dedicar integralmente aos estudos.

"Os estudos aperfeiçoam a natureza e  
são aperfeiçoados pela experiência."

(Francis Bacon)

TAKANO, Mauricio Iwama. Otimização da produção de uma célula flexível de manufatura com torno e fresadora CNC. 2010. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

## RESUMO

O processo de fabricação de lotes de peças em uma célula flexível de manufatura pode envolver diversos desafios, como, por exemplo, a formação do *layout*, seqüenciamento, balanceamento e a otimização dos parâmetros de corte das máquinas envolvidas, entre outros. Neste trabalho duas novas abordagens originais foram propostas e comparadas entre si, sendo capazes de minimizar não apenas o tempo de fabricação dos produtos, mas como também o seu custo. As duas abordagens consistem de três etapas seqüenciais, onde a primeira etapa é a minimização dos tempos de execução de cada peça em cada máquina. Os resultados obtidos são então utilizados como parâmetros para a segunda etapa da metodologia, onde as duas abordagens se diferenciam. Na primeira abordagem, a segunda etapa consiste no seqüenciamento da produção, enquanto na segunda abordagem esta etapa consiste na aplicação, de forma integrada, do seqüenciamento e do balanceamento da produção. O objetivo da segunda etapa nas duas abordagens é a minimização do tempo total de produção de todas as peças. Por fim, a partir do desenvolvimento do gráfico de GANTT dos resultados obtidos na segunda etapa da metodologia, são identificadas as operações onde podem ser aplicadas a minimização do custo de fabricação sem alterar o tempo total de produção dos lotes de peças. A primeira e a terceira etapa da metodologia foram realizadas utilizando Programação Não-Linear Inteira Mista e para a segunda etapa foi utilizada Programação Linear Inteira Mista. Para todas as etapas foi utilizado o *software* GAMS/BARON/MINOS/CPLEX para a solução dos modelos de otimização. Um problema envolvendo a fabricação de quatro produtos diferentes em uma célula flexível de manufatura, que possui um torno e uma fresadora com comando numérico computadorizado, foi proposto para testar a aplicabilidade e eficácia da nova metodologia. Os resultados foram satisfatórios, mostrando a factibilidade das duas abordagens, sendo que a segunda abordagem foi capaz de reduzir ainda mais o tempo e o custo de fabricação do lote de peças.

**Palavras-chave:** Otimização, usinagem, seqüenciamento, balanceamento.

TAKANO, Mauricio Iwama. Manufacturing optimization of a flexible manufacturing cell with a CNC turning and milling machine. 2010. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

## **ABSTRACT**

The manufacturing process for a mix of products in a flexible manufacturing cell may involve many challenges, such as layout definition, scheduling, balancing, and machine parameters optimization. Two new approaches have been proposed, which are capable of minimizing not only the manufacturing time of the products but also its cost. Both approaches consist of three sequential steps, where the first step is processing times minimization for each operation of each part in each machine. Then the obtained results are used as parameters for the second step of the methodology, which is the only step where the two approaches are different. At the first approach, this step consists on production sequencing, while at the second approach it is the execution of the production scheduling and balancing, in an integrated way. The goal of the second step at both approaches is makespan minimization. At the last step, based on the developed GANTT chart of the results of the second step of the methodology, minimization of operations production cost is performed without changing production makespan. The first and the third steps of the methodology were executed using Mixed Integer Nonlinear Programming and, for the second step, Mixed Integer Linear Programming was used. For all of the steps GAMS/BARON/MINOS/CPLEX software was used to perform the optimization. A problem involving the manufacture of four different products in a flexible manufacturing cell with a turning and a milling machine with computer numeric control was proposed to test the applicability and efficiency of the proposed methodology. Both approaches proved to be feasible to solve the proposed problem, while the second approach presented better results in reducing production makespan and costs of manufacture.

**Keywords:** Optimization, machining, scheduling, balancing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Os princípios do método branch-and-bound. (Adaptado de TAWARMALANI e SAHINIDS, 2002).....	8
Figura 2.2 – Exemplo de um gráfico de precedência (SCHOLL e VOSS, 1996) .....	15
Figura 3.1 – Direções das profundidades de corte no processo de fresamento .....	21
Figura 3.2 – Exemplo da remoção de material no desbaste para torneamento cilíndrico externo.....	25
Figura 3.3 – Representação gráfica do torneamento angular.....	26
Figura 3.4 – Representação gráfica do torneamento circular.....	26
Figura 3.5 – Exemplo da remoção de material no desbaste para fresamento.....	27
Figura 3.6 – Representação das variáveis $empty(m,k)$ e $wait(m,k)$ . (Adaptado de GUÉRET <i>et al.</i> , 2000).....	38
Figura 4.1 – Exemplo de um gráfico de GANTT. (TAKANO <i>et al.</i> , 2010). .....	51
Figura 5.1 – Foto da FMC da UTFPR no LASIM.....	53
Figura 5.2 – <i>Layout</i> simplificado da FMC da UTFPR campus Curitiba (FLEXSIM, 2009).....	54
Figura 5.3 – Relações de precedência das etapas de fabricação dos produtos.....	55
Figura 5.4 – Gráfico de GANTT dos resultados obtidos apenas com o seqüenciamento. ....	58
Figura 5.5 – Gráfico de GANTT dos resultados obtidos com o seqüenciamento e o balanceamento. ....	59
Figura 5.6 – Gráfico de GANTT dos resultados obtidos após minimização dos custos de fabricação. ....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tipos de problema de balanceamento (adaptado de Scholl e Becker (2006)).	13
Tabela 2.2 – Exemplo de restrições de precedência (SCHOLL e VOSS, 1996).....	15
Tabela 5.1 – Constantes utilizadas nas equações de otimização dos parâmetros de corte.	55
Tabela 5.2 – Duração das operações de fabricação do acoplamento de Ø7 nas máquinas.	56
Tabela 5.3 – Duração das operações de fabricação do acoplamento de Ø10 nas máquinas. .....	56
Tabela 5.4 – Duração das operações de fabricação do acoplamento de Ø12 nas máquinas. .....	56
Tabela 5.5 – Duração das operações de fabricação do acoplamento de Ø15 nas máquinas. .....	57
Tabela 5.6 – Resultados obtidos aplicando apenas o seqüenciamento da produção (1ª abordagem).....	58
Tabela 5.7 – Resultado balanceamento e seqüenciamento da produção. ....	59
Tabela 5.8 – Duração das operações da peça AC10 após aplicado a minimização dos custos. ....	60
Tabela 5.9 – Duração das operações da peça AC15 após aplicado a minimização dos custos. ....	60
Tabela 5.10 – Duração das operações da peça AC12 após aplicado a minimização dos custos. ....	61
Tabela 5.11 – Duração das operações da peça AC7 após aplicado a minimização dos custos. ....	61
Tabela 5.12 – Comparação do custo total de fabricação antes e depois da aplicação da minimização dos custos das operações.....	62
Tabela 5.13 – Comparação do custo total de fabricação antes e depois da aplicação da metodologia proposta.....	62
Tabela 5.14 – Dados da resolução computacional do modelo. ....	63

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AS/RS - *Automated Storage and Retrieval System* (Sistema Automático De Armazenamento E Recuperação)
- CNC - *Computer Numeric Control* (Controle Numérico Computadorizado)
- FMC - *Flexible Manufacturing Cell* (Célula Flexível de Manufatura)
- FMS - *Flexible Manufacturing System* (Sistema Flexível de Manufatura)
- LASIM - Laboratório de Automação e Sistemas Inteligentes de Manufatura
- MALBP - *Mixed Assembly Line Balancing Problem* (Problema de Balanceamento em Linha de Montagem de Múltiplos Modelos)
- MILP - *Mixed Integer Linear Programming* (Programação Linear Inteira Mista)
- MINLP - *Mixed Integer Non-Linear Programming* (Programação Não-Linear Inteira Mista)
- SALBP - *Simple Assembly Line Balancing Problem* (Problema de Balanceamento em Linha de Montagem de Modelo Único)
- UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a_{pa}$	- Profundidade de corte no acabamento no torno [mm];
$a_{paL}$	- Profundidade de corte mínima no acabamento no torno [mm];
$a_{paU}$	- Profundidade de corte máxima no acabamento no torno [mm];
$a_{pd}$	- Profundidade de corte no desbaste no torno [mm];
$a_{pdL}$	- Profundidade de corte mínima no desbaste no torno [mm];
$a_{pdU}$	- Profundidade de corte máxima no desbaste no torno [mm];
$a_{pt}$	- Profundidade de corte total no torno [mm];
$b_a$	- Largura do cavaco formado durante o processo de acabamento [mm];
$b_d$	- Largura do cavaco formado durante o processo de desbaste [mm];
$b_{pa}$	- Profundidade de corte radial no acabamento no torno [mm];
$b_{paL}$	- Profundidade de corte radial mínima no acabamento no torno [mm];
$b_{paU}$	- Profundidade de corte radial máxima no acabamento no torno [mm];
$b_{pd}$	- Profundidade de corte radial no desbaste no torno [mm];
$b_{pdL}$	- Profundidade de corte radial mínima no desbaste no torno [mm];
$b_{pdU}$	- Profundidade de corte radial máxima no desbaste no torno [mm];
$b_{pt}$	- Profundidade de corte radial total na fresadora [mm];
$c$	- Tempo de ciclo de produção [minutos];
$C_t$	- Constante obtida experimentalmente utilizada no cálculo de tempo de vida da ferramenta;
$D$	- Diâmetro da ferramenta de corte da fresadora [mm];
$d$	- Diâmetro da peça [mm];
$d(j)$	- Demanda da peça ( $j$ );
$d(m)$	- Demanda do modelo ( $m$ );
$d_a$	- Profundidade de corte axial no acabamento no torno [mm];
$d_{aL}$	- Profundidade de corte axial mínima no acabamento no torno [mm];
$d_{aU}$	- Profundidade de corte axial máxima no acabamento no torno [mm];
$d_d$	- Profundidade de corte axial no desbaste no torno [mm];
$d_{dL}$	- Profundidade de corte axial mínima no desbaste no torno [mm];
$d_{dU}$	- Profundidade de corte axial máxima no desbaste no torno [mm];
$d_t$	- Profundidade de corte axial total na fresadora [mm];
$dur(m,i)$	- Duração da operação ( $i$ ) na máquina ( $m$ ) [minutos];
$dur(m,j,k)$	- Duração da peça ( $j$ ), de posição ( $k$ ) do seqüenciamento, na máquina ( $m$ ) [minutos];
$dur(m,k)$	- Duração da peça de posição ( $k$ ) da seqüência na máquina ( $m$ ) [minutos];
$DUR(m,t)$	- Duração da tarefa ( $t$ ) na máquina ( $m$ ) [minutos];
$E(j)$	- Conjunto de operações que devem preceder a peça ( $j$ ) no gráfico de precedências;
$empty(m,k)$	- Tempo que a máquina ( $m+1$ ) fica parada esperando a máquina anterior ( $m$ ) concluir o processamento da peça de posição ( $k$ ) da seqüência de produção [minutos];
$F$	- Soma das diferenças entre tempo de ciclo e os tempos de utilização das estações de trabalho [minutos];
$f_a$	- Avanço no acabamento no torno [mm/revolução];
$f_{aL}$	- Avanço mínimo no acabamento no torno [mm/revolução];
$f_{aU}$	- Avanço máximo no acabamento no torno [mm/revolução];
$F_{ca}$	- Força de corte no acabamento [kgf];
$F_{cd}$	- Força de corte no desbaste [kgf];
$f_d$	- Avanço no desbaste no torno [mm/revolução];
$f_{dL}$	- Avanço mínimo no desbaste no torno [mm/revolução];
$f_{dU}$	- Avanço máximo no desbaste no torno [mm/revolução];

$f_{za}$	- Avanço no acabamento na fresadora [mm/dente];
$f_{zaL}$	- Avanço mínimo no acabamento na fresadora [mm/dente];
$f_{zaU}$	- Avanço máximo no acabamento na fresadora [mm/dente];
$f_{zd}$	- Avanço no desbaste na fresadora [mm/dente];
$f_{zdL}$	- Avanço mínimo no desbaste na fresadora [mm/dente];
$f_{zdU}$	- Avanço máximo no desbaste na fresadora [mm/dente];
$h_a$	- Espessura do cavaco formado durante o processo de acabamento [mm];
$h_d$	- Espessura do cavaco formado durante o processo de desbaste [mm];
$K$	- Custo total de fabricação [\$];
$K_1$	- Constante obtida experimentalmente utilizada na relação de profundidades de corte;
$K_2$	- Constante obtida experimentalmente utilizada na relação de velocidade de corte;
$K_3$	- Constante obtida experimentalmente utilizada na relação de avanço;
$K_c$	- Custos fixos da produção, que independem dos parâmetros de corte [\$/peça];
$K_{c1.1}$	- Pressão específica de corte para $(b_d \times h_d)$ igual a 1 mm <sup>2</sup> [N/mm <sup>2</sup> ];
$K_g$	- Constante obtida experimentalmente utilizada no cálculo de temperatura;
$K_p$	- Custo da hora máquina [\$/hora];
$K_t$	- Custo da ferramenta de corte [\$/ferramenta];
$l$	- Comprimento da peça [mm];
$L$	- Distância percorrida pela ferramenta de corte na fresadora [mm];
$L(j)$	- Conjunto de operações que devem suceder a peça ( $j$ ) no gráfico de precedências;
$l(k)$	- Tempo total disponível para a estação de trabalho ( $k$ ) [minutos];
$MAQ$	- Conjunto de máquinas em uma linha de produção;
$mc$	- Constante obtida experimentalmente utilizada no cálculo de força de corte;
$m_p$	- Quantidade de peças fabricadas;
$MP(j,m,k)$	- Número de vezes que a peça ( $j$ ), de posição ( $k$ ) do seqüenciamento, deve ser manipulada quando sendo manufaturada na máquina ( $m$ );
$n$	- Constante obtida experimentalmente utilizada no cálculo de tempo de vida da ferramenta;
$n_{ba}$	- Número de passes da ferramenta no sentido radial no acabamento na fresadora;
$n_{bd}$	- Número de passes da ferramenta no sentido radial no desbaste na fresadora;
$n_d$	- número de passes no sentido radial na fresadora;
$n_p$	- Número de passes da ferramenta no desbaste no torno;
$P_a$	- Potência de corte no acabamento [kW];
$P_{aU}$	- Potência máxima de corte no acabamento [kW];
$P_d$	- Potência de corte no desbaste [kW];
$P_{dU}$	- Potência máxima de corte no desbaste [kW];
$prec(i,ni)$	- Conjunto de operações ( $ni$ ) que devem suceder a operação ( $i$ );
$process(i,m,k)$	- Variável binária que define se a operação ( $i$ ), pertencente à peça de posição ( $k$ ) do seqüenciamento, será executada na máquina ( $m$ );
$Q_a$	- Temperatura durante o acabamento [°C];
$Q_{aU}$	- Temperatura máxima durante o acabamento [°C];
$Q_d$	- Temperatura durante o desbaste [°C];
$Q_{dU}$	- Temperatura máxima durante o desbaste [°C];
$r$	- Raio da ponta da ferramenta de corte [mm];
$r_a$	- Raio da região circular usinada da peça usinada [mm];
$rank(j,k)$	- Variável binária que define se a peça ( $j$ ) será realizada na posição ( $k$ ) do

	seqüenciamento;
$rank(t,k)$	- Variável binária que define se a tarefa ( $t$ ) está associada à posição ( $k$ ) do seqüenciamento;
<b>RANKS</b>	- Conjunto de posicionamentos de peças na seqüência de produção;
$R_{máx}$	- Rugosidade superficial máxima [ $\mu\text{m}$ ];
$s(k,i)$	- Tempo de início da peça de posição ( $i$ ) da seqüência na estação de trabalho ( $k$ ) [minutos];
$start(j,m,k)$	- Tempo de início da peça ( $j$ ), de posição ( $k$ ) do seqüenciamento, na máquina ( $m$ );
$T$	- Constante obtida experimentalmente utilizada no cálculo de temperatura;
$t(j)$	- Duração da peça ( $j$ ) [minutos];
$t_a$	- Tempo de remoção de material no acabamento [minutos];
$t_{aa}$	- Tempo de movimentação angular da ferramenta no acabamento no torno [minutos];
$t_{ad}$	- Tempo de movimentação angular da ferramenta no desbaste no torno [minutos];
$t_{apx}$	- Tempo que a ferramenta demora para se aproximar da peça usinada [minutos];
<b>TAR</b>	- Conjunto de tarefas em uma linha de produção;
$t_{ca}$	- Tempo de movimentação circular da ferramenta no acabamento no torno [minutos];
$t_{cd}$	- Tempo de movimentação circular da ferramenta no desbaste no torno [minutos];
$t_d$	- Tempo de remoção de material no desbaste [minutos];
$t_{df}$	- Tempo de remoção de material na fresadora no desbaste [minutos];
$t_{dfa}$	- Tempo total gasto com trocas de ferramenta no acabamento [minutos];
$t_{dfd}$	- Tempo total gasto com trocas de ferramenta no desbaste [minutos];
$t_{fa}$	- Tempo de movimentação ferramenta perpendicular ao eixo da peça no acabamento no torno [minutos];
$tfc(j,m,k)$	- Número de vezes que devem ser realizadas troca de ferramenta quando manufaturando a peça ( $j$ ), de posição ( $k$ ) do seqüenciamento, na máquina ( $m$ );
$t_{fd}$	- Tempo de movimentação ferramenta perpendicular ao eixo da peça no desbaste no torno [minutos];
$t_{fa}$	- Tempo de movimentação da ferramenta paralelo ao eixo da peça no acabamento no torno [minutos];
$t_{fd}$	- Tempo de movimentação da ferramenta paralelo ao eixo da peça no desbaste no torno [minutos];
$Tmf(j,m,k)$	- Tempo gasto com troca de ferramenta quando manufaturando a peça ( $j$ ), de posição ( $k$ ) do seqüenciamento, na máquina ( $m$ ) [minutos];
$Tmp(j,m,k)$	- Tempo gasto com a manipulação da peça ( $j$ ), de posição ( $k$ ) do seqüenciamento, na máquina ( $m$ ) [minutos];
$t_{mr}$	- Tempo que o robô demora para posicionar e retirar a peça da máquina [minutos];
$t_{mud}$	- Tempo que a máquina demora para mudar a ferramenta no <i>magazine</i> de ferramentas [minutos];
$t_p$	- Tempo de remoção de material [minutos];
$T_s$	- Tempo secundário [minutos/peça];
$t_{setup}$	- Tempo de <i>setup</i> da máquina para um lote de peças [minutos];
$T_t$	- Tempo total de máquina [minutos];
$t_{ffa}$	- Tempo de troca de uma ferramenta no acabamento [minutos];
$t_{ffd}$	- Tempo de troca de uma ferramenta no desbaste [minutos];
$T_{tl}$	- Tempo total de fabricação dos lotes, ou <i>makespan</i> [minutos].

$T_{va}$	- Tempo de vida da ferramenta de acabamento [minutos];
$T_{vd}$	- Tempo de vida da ferramenta de desbaste [minutos];
$V_{ca}$	- Velocidade de corte no acabamento [m/minuto];
$V_{caL}$	- Velocidade de corte mínima para o acabamento [m/minuto];
$V_{caU}$	- Velocidade de corte máxima para o acabamento [m/minuto];
$V_{cd}$	- Velocidade de corte no desbaste [m/minuto];
$V_{cdL}$	- Velocidade de corte mínima para o desbaste [m/minuto];
$V_{cdU}$	- Velocidade de corte máxima para o desbaste [m/minuto];
$V_{sa}$	- Velocidade de avanço da mesa da fresadora no acabamento [m/minuto];
$V_{sd}$	- Velocidade de avanço da mesa da fresadora no desbaste [m/minuto];
$w(k,i)$	- Tempo de sobre carregamento da peça de posição ( $i$ ) da seqüência na estação de trabalho ( $k$ ) [minutos];
$wait(m,k)$	- Tempo que a máquina ( $m$ ) fica parada esperando a máquina ( $m+1$ ) liberar a peça de posição ( $k-1$ ) da seqüência para que ela possa passar a peça de posição ( $k$ ) da seqüência à diante [minutos];
$WO$	- Sobre carregamento total na linha de produção [minutos];
$X(j,k)$	- Variável binária que define se a peça ( $j$ ) está associada à posição ( $k$ ) do seqüenciamento;
$x(m,i)$	- Variável binária que define se a peça ( $m$ ) está associada à posição ( $i$ ) do seqüenciamento;
$x_1$	- Raio equivalente ao ponto inicial nos torneamentos angular, de faceamento e circular [mm];
$x_2$	- Raio equivalente ao ponto final nos torneamentos angular, de faceamento e circular [mm];
$x_c$	- Raio equivalente ao centro da região circular da peça usinada [mm];
$x_f$	- Raio equivalente ao ponto final da região usinada [mm];
$x_i$	- Raio equivalente ao ponto inicial da região usinada [mm];
$z$	- Número de dentes da ferramenta de corte da fresadora;
$\delta$	- Tolerância dimensional da superfície da peça [ $\mu$ m];
$\delta_1$	- Constante obtida experimentalmente utilizada no cálculo de temperatura;
$\Delta_{fi}$	- Distância entre o ponto final e o ponto inicial da região usinada [mm];
$\theta_{fi}$	- Ângulo formado entre o ponto final e o ponto inicial de um segmento de reta ou uma região circular [ $^\circ$ ];
$P(k,i)$	- Duração da peça de posição ( $i$ ) da seqüência na estação de trabalho ( $k$ ) [minutos];
$\tau(m,k)$	- Duração da peça ( $m$ ) na estação de trabalho ( $k$ ) [minutos];
$\Phi$	- Constante obtida experimentalmente utilizada no cálculo de temperatura;

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Objetivo Geral.....	2
1.2	Justificativa .....	3
1.3	Conteúdo do Trabalho.....	3
2	EMBASAMENTO TEÓRICO.....	5
2.1	Métodos de Otimização.....	5
2.2	Parâmetros de Corte para Tornos e Fresadoras .....	9
2.3	Seqüenciamento da Produção .....	11
2.4	Balanceamento da Produção .....	12
3	MODELAGEM DO PROBLEMA NA LITERATURA.....	17
3.1	Parâmetros de Corte .....	17
3.2	Seqüenciamento da Produção .....	36
3.3	Balanceamento da Produção .....	41
4	METODO PROPOSTO.....	44
4.1	Modelo Matemático do Seqüenciamento e Balanceamento de uma FMC.....	45
5	RESULTADOS .....	53
5.1	Minimização dos Tempos de Execução das Operações .....	55
5.2	Seqüenciamento e Balanceamento da Produção .....	57
5.3	Minimização dos Custos de Execução das Operações .....	59
6	CONCLUSÃO.....	64
6.1	Resultados Obtidos .....	64
6.2	Sugestões de Continuidade .....	65
	REFERÊNCIAS 66	
	APÊNDICE A – DESENHOS TÉCNICOS E FOLHAS DE PROCESSO.....	72
	APÊNDICE B – PARÂMETROS DE CORTE PARA A MINIMIZAÇÃO DOS TEMPOS DE USINAGEM NO TORNO E NA FRESADORA.....	84
	APÊNDICE C – PARÂMETROS DE CORTE PARA A MINIMIZAÇÃO DOS CUSTOS DE FABRICAÇÃO NO TORNO .....	86
	APÊNDICE D - PRODUÇÃO CIENTÍFICA NO PERÍODO (Setembro 2008 – Agosto 2010)87	

# 1 INTRODUÇÃO

O Sistema Flexível de Manufatura (FMS<sup>1</sup>) é um sistema de produção automatizado, capacitado a produzir, segundo Basnet e Mize (1994), uma grande variedade de diferentes peças e produtos, usando o mesmo equipamento e o mesmo sistema de controle. Segundo Xiaobo e Ohno (1999), o FMS é composto de estações de trabalho, um sistema de manuseio de material e um sistema de controle computadorizado, onde cada estação de trabalho pode incluir um local de armazenamento (ou *buffer*) limitado de entrada, um conjunto de diversas máquinas e pode incluir um local de armazenamento (ou *buffer*) limitado de saída. O sistema de manuseio é composto de diversos sistemas de transporte que manuseiam a matéria prima pelas estações de trabalho, de acordo com os processos necessários para cada peça. O sistema de controle computadorizado é responsável por comunicar e comandar as diversas estações de trabalho e os diversos sistemas de transporte do FMS.

Um conceito mais recente é o da célula flexível de manufatura (FMC<sup>2</sup>) que, segundo Savsar (2000), consiste em um robô, uma ou mais máquinas flexíveis, incluindo inspeção e um sistema de manuseio de material para movimentar matérias primas e peças acabadas dentro e fora da célula. A FMC é, na verdade, uma célula de manufatura pertencente ao FMS, ou seja, o sistema flexível de manufatura pode englobar duas ou mais células flexíveis de manufatura. Em função do seu custo, seria de se esperar um número significativo de trabalhos científicos voltados à otimização da operação de uma FMC/FMS de usinagem, já que o processo de fabricação de um *mix* de peças em uma FMC pode envolver diversos desafios, como, por exemplo, a formação do *layout*, seqüenciamento, balanceamento e a otimização dos parâmetros de corte (usinagem) das máquinas envolvidas, entre outros.

Os desafios envolvem decisões que devem ser feitas para cada problema que pode ser encontrado em uma FMC. Cada decisão realizada em um dos problemas pode alterar decisões tomadas em outros problemas (*e.g.* quando são definidos os parâmetros ótimos de corte de uma máquina da célula, esse resultado pode alterar o seqüenciamento da produção). Porém, na literatura são encontrados trabalhos que estudam cada problema da FMC individualmente. Ou seja, cada problema é tratado como se não fosse afetar decisões tomadas em outros problemas.

Os métodos aplicados para a otimização podem ser, segundo Rodrigues (2008), divididos em heurísticos e exatos. Os métodos heurísticos são métodos de simulação, onde

---

<sup>1</sup> Flexible Manufacturing System

<sup>2</sup> Flexible Manufacturing Cell

são gerados uma ou mais soluções que são comparadas e testadas para verificação quanto à sua factibilidade. O método exato é um métodos que envolve um modelamento matemático, que, segundo Hillier e Lieberman (1995), pode variar em tamanho e complexidade.

Neste trabalho é proposta a integração dos problemas que podem ser encontrados em uma FMC. Para isso, são propostas duas novas abordagens para a otimização da produção em uma Célula Flexível da Manufatura. Na primeira abordagem é feita a integração dos problemas de otimização dos parâmetros de corte nas máquinas envolvidas na fabricação e de seqüenciamento da produção. Na segunda abordagem é realizada a integração não apenas dos problemas de otimização dos parâmetros de corte nas máquinas envolvidas na produção e de seqüenciamento da produção, mas também do problema de balanceamento da produção.

## 1.1 Objetivo Geral

O trabalho tem como objetivo formular e testar modelos matemático capazes de otimizar a produção de um *mix* de peças dentro de uma FMC que contém um torno e uma fresadora com comando numérico computadorizado (CNC), visando minimizar o tempo de fabricação com o mínimo custo, decorrente de trocas de ferramentas.

### Objetivos Específicos

Para se alcançar o objetivo geral alguns objetivos específicos são a seguir definidos:

- Formular o modelo de otimização (minimizando o tempo ou o custo de produção de uma peça) dos parâmetros de corte num torno e numa fresadora;
- Formular modelos matemáticos para os problemas de seqüenciamento e de balanceamento da produção numa FMC;
- Propor duas abordagens que resolvam, seqüencialmente, a minimização dos tempos de usinagem das peças, o seqüenciamento (e, na segunda abordagem, o balanceamento) da produção na FMC e a minimização dos custos de usinagem das peças, sem alterar o tempo total de produção das peças (nos recursos “gargalo de produção”);
- Testar a factibilidade das abordagens com o uso do *software* GAMS com os *solvers* BARON, MINOS e CPLEX.

## 1.2 Justificativa

A fabricação de produtos customizados, ou seja, produtos produzidos apenas para um cliente, geralmente em pequena escala, é cada vez mais comum nas indústrias. Esse novo cenário faz com que as indústrias sejam forçadas a investir cada vez mais na automação do processo de fabricação, introduzindo flexibilidade às linhas de produção para que um mesmo conjunto de máquinas possa produzir diferentes tipos de peças (SAVSAR, 2000). Por este motivo o uso das FMCs tem crescido significativamente.

Devido ao alto custo de implantação e de utilização das FMCs, todo e qualquer método capaz de reduzir os custos de produção e/ou aumentar a taxa de fabricação é justificável.

Os modelos matemáticos e metodologias propostos para o trabalho são inovadores, não tendo sido encontrados na literatura. Portanto, o presente trabalho contribuirá, também, com o desenvolvimento de novos modelos matemáticos e de metodologias que poderão ser utilizados em estudos futuros.

## 1.3 Conteúdo do Trabalho

O trabalho é dividido de forma a documentar todo o seu desenvolvimento. Inicia-se o primeiro capítulo com a introdução, fornecendo-se uma visão geral do que será estudado no trabalho, quais são os objetivos e os motivos do seu desenvolvimento.

O segundo capítulo apresenta quais são os problemas que serão trabalhados, definindo quais são os parâmetros dentro da FMC que devem ser otimizados e quais as dificuldades encontradas em determinar cada um destes parâmetros. Apresenta-se também uma fundamentação teórica do problema.

No terceiro capítulo são apresentadas diversas metodologias empregadas por outros autores, as formulações matemáticas existentes atualmente para solução do problema em estudo e o que tem sido apresentado na literatura para otimizar a produção de lotes de peças dentro de uma FMC.

O capítulo quatro apresenta os métodos aplicados para otimizar o processo de fabricação dentro de uma FMC, explicando os novos métodos aplicados ao trabalho e como ela será validada.

No quinto capítulo é apresentado o modelo matemático que será utilizado para a otimização da fabricação de uma FMC. Com um descritivo de cada equação do modelo.

Também são apresentadas as peças utilizadas para os cálculos, os parâmetros utilizados nas equações e os resultados obtidos.

No sexto capítulo são discutidos os resultados obtidos no trabalho, quais foram as melhorias obtidas com a aplicação do novo modelo proposto. Por fim, no sétimo capítulo são apresentadas as conclusões finais do trabalho e uma discussão de possíveis trabalhos futuros.

## 2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Segundo Lee e Dicesare (1994), o constante aumento de flexibilidade de uma FMC oferece um maior número de escolhas de recursos e rotinas e permite uma maior produtividade, porém impõe alguns desafios, como por exemplo, a alocação dos equipamentos para diferentes processos necessários para a produção de um determinado produto e o planejamento da seqüência das atividades para alcançar a maior eficiência produtiva.

### 2.1 Métodos de Otimização

A fim de posteriormente revisar os problemas de otimização presentes numa FMC, ainda neste capítulo, nesta seção é apresentada uma breve revisão das principais abordagens de Pesquisa Operacional usadas para resolver tais problemas. A otimização de um processo é uma etapa importante para qualquer empresa que pretende reduzir custos e/ou melhorar desempenho. Os métodos de otimização podem ser divididos em heurísticos e exatos (Programação Matemática e Inteligência Artificial) (RODRIGUES, 2008).

#### 2.1.1 Métodos Heurísticos

Os métodos heurísticos podem ser mais fáceis de serem implementados que os métodos exatos. Isso se deve ao fato de, normalmente, os métodos heurísticos serem métodos de simulação, onde uma ou várias soluções do problema são geradas; que depois são verificadas quanto à sua qualidade e factibilidade. Porém, uma característica conhecida dos métodos heurísticos é que não se pode afirmar que o melhor resultado obtido utilizando estes métodos é de fato a solução ótima (ou é o ótimo global). Os métodos exatos, por outro lado, exigem que o objetivo dos problemas e suas restrições sejam adequadamente representados como expressões matemáticas (RODRIGUES, 2008). Assim, os métodos heurísticos dispensam a preocupação de desenvolver um “modelo adequado” do problema (o que pode consistir num desafio), desde que as restrições sejam atendidas. Entre os vários métodos heurísticos existentes, pode-se destacar:

- O *Simulated Annealing* (AARTS, 1989) é uma técnica de busca probabilística baseado em uma analogia com a mudança de estado do material quando simulando seu

resfriamento após ser aquecido à sua forma líquida, equivalente a um processo de têmpera ou de recozimento;

- A Busca Tabu (GLOVER e LAGUNA, 1997) é um método de busca que se utiliza de uma lista chamada de "Lista Tabu", a qual tem a finalidade de evitar que o programa fique preso em um máximo ou mínimo local;
- O Algoritmo Genético (GOLDBERG, 1989) é um método de busca probabilística baseado na teoria da evolução natural, onde o mais "forte" possui mais chances de sobreviver. O método utiliza conceitos de pais, filhos, clonagem, *crossover*, mutação e população, entre outros, tal como na genética;
- A colônia de formiga (DORIGO *et al.*, 1996) se baseia na tentativa de reprodução da habilidade das formigas, quase cegas, em encontrar o caminho mais curto entre seus ninhos e a comida;
- A técnica de *Particle Swarm Optimization* (SARAVANAN *et al.*, 2005), assim como os algoritmos genéticos, consiste numa abordagem de *Computação Evolucionária* que tenta imitar a "evolução" de uma população de indivíduos (ou soluções para o problema). Esta técnica se baseia no comportamento social de pássaros e peixes para controlar a geração de "populações" de soluções para o problema tratado.

### 2.1.2 Métodos Exatos

Em função do problema, o modelamento matemático de um método exato pode ser classificado como, por exemplo, um problema de Programação Linear, Programação Inteira, Programação Linear-Inteira Mista, Programação Não-Linear e Programação Não-Linear Inteira Mista (HILLIER E LIEBERMAN, 1995). Segundo Hillier e Lieberman (1995):

- Problemas envolvendo Programação Linear (LP<sup>3</sup>) são problemas nos quais as expressões matemáticas (representando a função objetivo e as restrições) envolvidas são apenas lineares e onde todas as variáveis podem assumir valores não inteiros reais;
- Problemas envolvendo Programação Inteira (IP<sup>4</sup>) são problemas onde todas as variáveis de decisão só podem assumir valores inteiros e as expressões matemáticas são lineares;

---

<sup>3</sup> Linear Programming

<sup>4</sup> Integer Programming

- Problemas envolvendo Programação Linear-Inteira Mista (MILP<sup>5</sup>) são problemas similares aos de programação inteira, mas onde algumas variáveis de decisão podem assumir valores não inteiros;
- Problemas envolvendo Programação Não-Linear (NLP<sup>6</sup>) são problemas que possuem ao menos uma expressão matemática (a função objetivo ou alguma das restrições) não linear (*i.e.*, com produto de variáveis ou variáveis com expoente) e onde todas as variáveis podem assumir valores não inteiros reais;
- Problemas envolvendo Programação Não-Linear Inteira Mista (MINLP<sup>7</sup>) são problemas similares à Programação Não-Linear, mas que possuem variáveis de decisão que devem assumir valores inteiros e outras variáveis de decisão que podem assumir valores não inteiros.

### Solução de Problemas MINLP

Como existem vários *softwares* comerciais para resolver problemas LP, IP e MILP, sendo que este trabalho de dissertação dispôs do CPLEX (GAMS, 2010), não será apresentada uma revisão de suas técnicas de solução. Porém, a literatura sobre problemas MINLP ainda é incipiente. Assim, uma breve revisão da abordagem de solução destes problemas pelo *software* disponível, BARON (GAMS, 2010; Tawarmalani e Sahinidis, 2002), será apresentada.

Tawarmalani e Sahinidis (2002) afirmam que a aplicação do método exato conhecido como *branch-and-bound* também pode resolver problemas que envolvam programação não-linear inteira mista (MINLP). Resumidamente, este método resolve um problema (P) qualquer construindo e resolvendo um problema “relaxado” (R). O problema (R) é construído aumentando-se a região de valores factíveis do problema (P).

A figura 2.1 ilustra um exemplo da idéia fundamental do método *branch-and-bound* apresentado por Tawarmalani e Sahinidis (2002), para a solução de um problema com programação não linear (NLP) (que é mais simples que um problema MINLP). No exemplo é considerada a minimização de uma função de uma variável que possui dois mínimos locais. Inicialmente o problema “relaxado” (R) do problema (P) é criado e resolvido, obtendo-se seu valor de limite inferior (L), conforme indicado na figura 2.1a. A variável utilizada para se obter o valor L é aplicada ao problema P e o resultado obtido é utilizado para dividir o problema em dois problemas menores (P1 e P2). São então aplicados procedimentos para se

---

<sup>5</sup> *Mixed Integer-Linear Programming*

<sup>6</sup> *Nom-Linear Programming*

<sup>7</sup> *Mixed Integer Nom-Linear Programming*

encontrar tanto o mínimo local como determinar o limite superior (U) para o problema. Num problema de minimização, o menor mínimo local dos subproblemas (P1 e P2) corresponderá ao limite superior (U), conforme indicado na figura 2.1b. Se (U-L) for suficientemente pequeno (definido pelo programador), o procedimento termina com o valor do limite superior obtido. Caso contrário, os problemas P1 e P2 são resolvidos da mesma forma que P, ou seja, são criados os problemas “relaxados” (R1 e R2) para cada problema P1 e P2. Um novo limite inferior (L) e um novo limite superior (U) serão encontrados, aproveitando-se dos tamanhos reduzidos dos problemas, conforme indicado na figura 2.1c.

Um problema MINLP pode conter um número significativo de pontos de mínimo ou máximo locais. A idéia do *branch-and-bound* é identificar essas regiões de mínimo ou máximo locais e eliminar da busca as regiões menos promissoras; onde (no caso de um problema de minimização), se o mínimo local for superior ao menor U (dentre todos os subproblemas P1, P2, ..., Pn), então esta região será eliminada da busca, conforme indicado na figura 2.1d. Na figura 2.1d observa-se que o subproblema “relaxado” R2 é eliminado; *i.e.*, o subproblema “relaxado” R2 não é subdividido em dois outros problemas. Isso ocorreu porque o valor de seu limite inferior (L) é maior do que o limite superior (U) do subproblema P1, como pode ser observado na figura 2.1c.

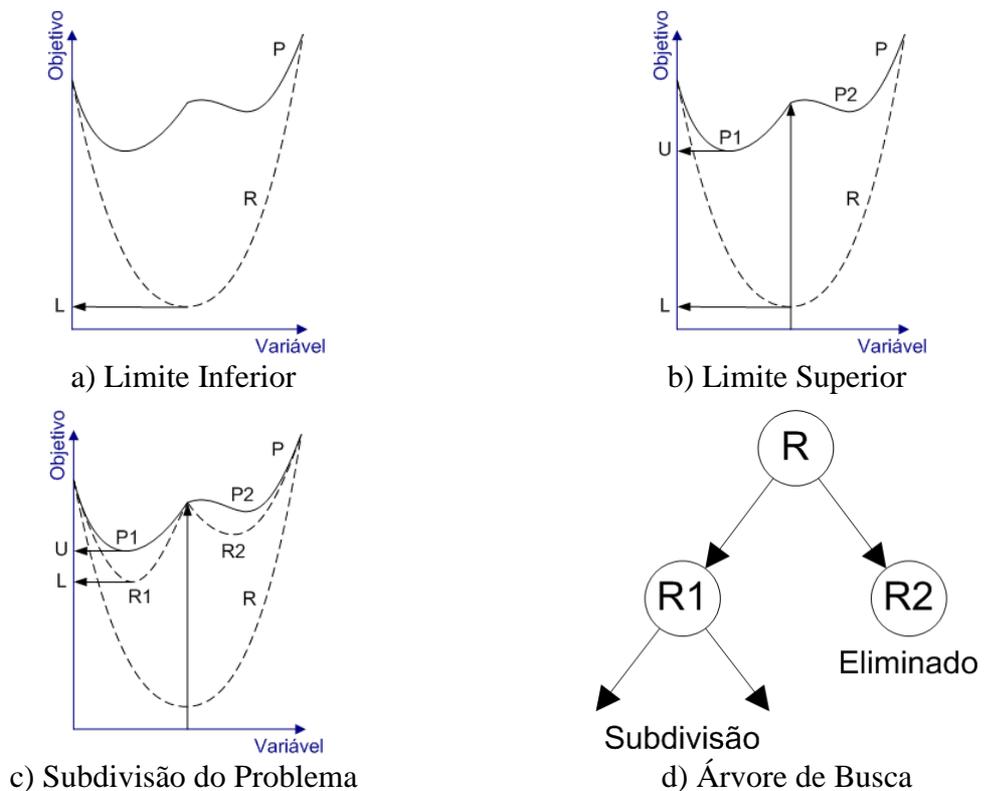


Figura 2.1 – Os princípios do método branch-and-bound. (Adaptado de TAWARMALANI e SAHINIDS, 2002).

O processo de otimização da FMC pode começar desde a sua implantação, onde é definido o *layout* da célula, continuando com a definição da melhor seqüência de fabricação (no caso de fabricação de mais de um modelo de peças), assim como também o balanceamento da produção e a otimização dos parâmetros de processamento usados em cada máquina. Sempre que há alterações no processo de fabricação ou no *mix* de produção pode-se realizar novamente o seqüenciamento, o balanceamento e a otimização dos parâmetros de processamento das máquinas.

## 2.2 Parâmetros de Corte para Tornos e Fresadoras

Os tornos e as fresadoras com CNC são equipamentos muito utilizados na fabricação de peças dentro de uma FMC e definir os parâmetros ótimos de usinagem para eles pode ser uma tarefa difícil. SU e CHEN (1999) afirmam que os parâmetros de usinagem afetam significativamente no custo, na produtividade e na qualidade das peças usinadas. No entanto, mesmo sendo uma etapa muito importante para o processo de fabricação, a definição dos parâmetros ótimos de usinagem usando alguma abordagem de Pesquisa Operacional pode ser considerado um tema de pesquisa pouco explorado, podendo-se citar como autores que se dedicaram ao tema SARAVANAN *et al.* (2003), SARAVANAN *et al.* (2005), WANG e LIU (2007), SU e CHEN (1999), SANKAR *et al.* (2007), entre outros.

Conforme Saravanan *et al.* (2003), Wang e Liu (2007), SU e Chen (1999), Sankar *et al.* (2007), entre outros, os parâmetros que devem ser otimizados na usinagem são a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte. Numa FMC, a otimização dos parâmetros de corte deve ser realizada individualmente para cada etapa de fabricação de cada peça e em cada máquina. Os parâmetros de corte para se obter o tempo mínimo de processamento de cada etapa de produção de cada peça são obtidos, de forma que o tempo total de fabricação das peças seja minimizado. Porém, em casos onde há ociosidade de máquina ou tempo de peça parada (*e.g.* aguardando a liberação de uma máquina), os parâmetros de corte podem ser definidos visando a minimização dos desgastes da ferramenta, minimizando, assim, os gastos com trocas ou re-afiações destas, de forma que, apesar do aumento do tempo de processamento de determinadas etapas de produção, o tempo total de fabricação dos lotes não seja alterado.

Para se obter os parâmetros ótimos de usinagem podem ser utilizados métodos heurísticos (*e.g.* SARAVANAN *et al.*, 2003; SARAVANAN *et al.*, 2005; SU e CHEN, 1999; SANKAR *et al.*, 2007) e/ou exatos (WANG e LIU, 2007), havendo uma predominância do uso de métodos heurísticos. Isto, de modo geral, pode ser explicado porque os métodos

heurísticos, para problemas não lineares, podem ser mais simples de serem implementados e solucionados do que a programação matemática, devido à forma de solução destes problemas nas duas abordagens. Para determinar os parâmetros ótimos de usinagem, o modelo matemático do problema, que associe os parâmetros de corte e acabamento da peça, envolverá restrições não lineares. Mas a complexidade de solução usando métodos heurísticos, normalmente, não é afetada pela não-linearidade do problema, já que suas principais influências são a representação da solução (e não seu modelo matemático) e a forma de busca (na vizinhança da(s) solução(ões) vigente(s)). Porém, na programação matemática, a complexidade do problema será aumentada caso o problema seja não-linear, quando comparada a um problema linear (RODRIGUES, 2008).

Segundo SARAVANAN *et al.* (2003), o processo de usinagem de uma peça é dividido em dois estágios, o processo de desbaste e o processo de acabamento. O desbaste consiste em vários passes da ferramenta removendo o máximo de material possível, sem comprometer a ferramenta, a máquina ou a peça sendo usinada. O acabamento, por outro lado, consiste em um único passe da ferramenta contornando a peça depois de quase todo sobre-metal ter sido removido no processo de desbaste. No processo de acabamento, o mais importante é que, ao término do processo, a peça seja finalizada com a rugosidade e as dimensões especificadas no projeto.

Os estudos sobre economia nos processos de usinagem são originalmente creditados a Gilbert (1950 *apud* LEE e TARNG, 2000). Reddy *et al.* (1998) utilizaram um algoritmo genético para resolver o problema de redução de custo em um processo de torneamento de múltiplos passos, considerando profundidades de corte variadas no processo de desbaste. Sönmez *et al.* (1999) otimizaram um processo de fresamento de múltiplos passos utilizando programação geométrica<sup>8</sup>. Su e Chen (1999) e Saravanan *et al.* (2003) utilizaram um método de otimização estocástica baseado no algoritmo de *simulated annealing* e na identificação de padrões para resolver os problemas de otimização do processo de torneamento de peças de forma contínua.

Meng *et al.* (2000) utilizaram um modelo matemático, que otimiza os parâmetros de corte em cada passada da ferramenta individualmente, baseado no método denominado *Orthogonal Machining Theory*, com o objetivo de reduzir o custo de fabricação em operações de torneamento. Lee e Tarng (2000) utilizaram a programação seqüencial quadrática para resolver um modelo matemático proposto, baseado numa rede polinomial<sup>9</sup>, para encontrar os parâmetros ótimos de corte no torneamento capazes de minimizar custo ou maximizar a produção. Shunmugan *et al.* (2000) otimizaram o processo de múltiplos

---

<sup>8</sup> Vide Boyd *et al.* (2007)

<sup>9</sup> Vide Barron (1984 *apud* LEE e TARNG, 2000)

passos de faceamento no fresamento utilizando algoritmo genético. Saravanan *et al.* (2001) compararam resultados da minimização do tempo de produção em um torno utilizando métodos exatos de otimização (“*Nelder Meas Simplex Method*” e “*Boundary Search Procedure*”) e métodos heurísticos (algoritmo genético e *simulated annealing*). Tandon *et al.* (2002) utilizaram a *particle swarm optimization* e um modelo de rede neural artificial (que é uma abordagem de inteligência artificial) para otimizar os parâmetros de corte em uma fresadora de comando numérico.

Vijayakumar *et al.* (2003) utilizaram a colônia de formigas para otimizar o custo de produção de um processo de torneamento de múltiplas passadas. Baskar *et al.* (2005) otimizaram os parâmetros de corte em operações de fresamento usando o algoritmo genético, a busca Tabu, a colônia de formigas e o *particle swarm optimization*. Saravanan *et al.* (2005) minimizaram o custo do torneamento de peças cilíndricas utilizando seis métodos heurísticos: o algoritmo genético, o *simulated annealing*, a busca Tabu, o algoritmo memético, a colônia de formigas e a *particle swarm optimization*. Baskar *et al.* (2006) otimizaram os parâmetros de corte para operações com múltiplas ferramentas em fresadoras usando algoritmo memético, que é uma variante dos algoritmos genéticos.

Henriques (2006) propôs um novo modelo para otimização dos parâmetros de corte, considerando não apenas a minimização do tempo de torneamento e a minimização do custo da produção como também o seqüenciamento da produção. SANKAR *et al.* (2007) utilizaram um algoritmo genético híbrido para resolver o problema de otimização do processo de torneamento em múltiplos passos. Rodrigues *et al.* (2009) compararam três métodos de otimização para definir os parâmetros de corte de um torno CNC (programação matemática, *simulated annealing* e algoritmo genético). Takano *et al.* (2010) propuseram uma nova metodologia dividida em três etapas seqüenciais, onde o menor tempo de fabricação pudesse ser atingido ao menor custo possível.

### 2.3 Seqüenciamento da Produção

No caso da produção de um lote de peças variadas (ou seja, uma seqüência de “lotes” que podem ser unitários), faz-se necessário definir a seqüência da produção, ou seja, a decisão da ordem de produção das peças. O seqüenciamento da produção tem como objetivo reduzir o tempo de máquina parada, reduzindo, assim, o tempo total (ou *lead time*) de fabricação do lote (JERALD *et al.*, 2005). Esse seqüenciamento deve levar em consideração a disponibilidade de máquinas e outros equipamentos, tais como robôs,

esteiras e o tempo de *setup*<sup>10</sup> das máquinas, sendo que o tempo de *setup* pode variar conforme o seqüenciamento da produção (LOW *et al.*, 2005).

Lee e Dicesare (1994) propuseram a utilização de uma rede de Petri<sup>11</sup> combinada com uma busca heurística para planejar o seqüenciamento de produção para sistemas flexíveis de manufatura. Wang *et al.* (2004) utilizaram um algoritmo genético para otimizar o seqüenciamento da produção. Jerald *et al.* (2005) otimizaram o seqüenciamento usando algoritmos meméticos, o *simulated annealing*, o algoritmo genético e a *particle swarm optimisation algorithm*. Low *et al.* (2005) apresentaram um modelamento matemático, que pode ser resolvido com o uso de um método heurístico, para o problema com três objetivos: *i*) reduzir o tempo total de produção do lote; *ii*) reduzir a soma dos atrasos das operações (ou *total job tardiness*); e *iii*) reduzir o tempo total de máquina parada. Ecker e Gupta (2005) desenvolveram um algoritmo para definir a seqüência de produção que minimize o tempo de troca de ferramentas em máquinas que possuem um número fixo e limitado de ferramentas no magazine. Saidi-Mehrabad e Fattahi (2007) utilizaram a Busca Tabu para analisar a melhor seqüência de produção e para escolher as máquinas que seriam colocadas na célula de manufatura. Kim e Jeong (2007) propuseram um Algoritmo Genético adaptado para planejar o seqüenciamento de produção com o objetivo de não haver esperas durante a manufatura das peças.

Por se tratar de uma FMC, faz-se importante ainda, para este estudo, aplicar uma restrição de movimentação das peças, ou seja, quando uma máquina está usinando alguma peça, a peça que vem em seguida fica impossibilitada de seguir para a máquina seguinte.

## 2.4 Balanceamento da Produção

As linhas de produção podem ser classificadas, pela quantidade de peças manufaturadas e pela seqüência de fabricação, de duas formas, segundo SCHOLL (1999):

- Linha de modelo único, quando apenas um único modelo de peça passa pela linha. Os problemas relacionados a esta linha de produção são conhecidos como *Single-Model Assembly Line Balancing Problem* (SALBP);
- Linha de modelos mistos, quando dois ou mais modelos diferentes de peças são fabricados na mesma linha. Os problemas relacionados a esta linha de produção são conhecidos como *Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem* (MALBP).

---

<sup>10</sup> *Setup* é o tempo de preparação da máquina para fabricar um produto (e.g. troca da ferramenta de corte)

<sup>11</sup> Vide Zhou e DiCesare (1993)

Assim como os problemas definidos como SALBP, os problemas de modelo misto, ou MALBP (*Mixed-model Assembly Line Balancing Problem*), podem ser divididos em quatro tipos, de acordo com sua função objetivo (SCHOLL E BECKER, 2006): MALBP-1, MALBP-2, MALBP-E e MALBP-F. Uma comparação entre eles é apresentada na Tabela 2.1, conforme Scholl e Becker (2006). Nessa tabela verifica-se que, por exemplo, o problema MALBP-1 visa minimizar o número de estações de trabalho para um dado tempo de ciclo. Por outro lado, se possuímos um número de estações de trabalho dado *a priori* e desejarmos minimizar o tempo de ciclo, estaremos tratando de um problema do tipo MALBP-2. O problema MALBP-F visa checar a factibilidade quando o número de estações de trabalho e o tempo de ciclo são dados, enquanto o problema MALBP-E visa a minimização tanto do número de estações de trabalho como do tempo de ciclo, normalmente realizada iterativamente (SCHOLL E BECKER, 2006).

Tabela 2.1 – Tipos de problema de balanceamento (adaptado de Scholl e Becker (2006))

	Tempo de ciclo	
	Dado	Minimizar
Número de estações		
Dado	MALBP-F	MALBP-2
Minimizar	MALBP-1	MALBP-E

O problema de balanceamento, que na literatura é tratado apenas em linhas de montagem (e.g. SCHOLL, 1999; BECKER e SCHOLL, 2006, BATTINI *et al.*, 2009, BOCK *et al.*, 2006, entre outros), pode ser traduzido como sendo o problema de decisão da divisão ótima das tarefas de montagem nas estações de trabalho, respeitando alguns objetivos e restrições (SCHOLL, 1999). Porém, dentro de uma linha de fabricação com duas ou mais máquinas pode haver um desbalanceamento de máquinas/carga de operadores, podendo ser aplicado o balanceamento da produção, com o objetivo de distribuir o mais igualmente possível a utilização de todas as máquinas/operadores dentro desse sistema. A máquina com o maior tempo de uso, ou seja, aquela com maior ocupação, é chamada de “gargalo” da produção. Segundo Rajakumar *et al.* (2007), o objetivo do balanceamento é eliminar os “gargalos”, pois sua presença não deixa o sistema alcançar sua capacidade máxima.

Note que a alocação de tarefas a uma máquina pode ocorrer via um procedimento *ad hoc*, via otimização da formação de células ou via balanceamento da produção, sendo que, na literatura, o balanceamento da produção normalmente só é aplicado a operações de montagem. Conseqüentemente, um dos objetivos deste trabalho é discutir a aplicação do balanceamento da produção para um problema de usinagem de peças. Ao se tratar um sistema de produção do tipo *Flow Shop* (ou célula de manufatura), a seqüência (ou receita)

de produção de todas as peças já foi definida juntamente com a formação de células e do *layout* da célula de fabricação.

A seqüência de produção em uma FMC é do tipo *Flow Shop*. Segundo Scholl e Klein (1999), essas linhas geralmente possuem estações de trabalhos arranjadas em linha, onde cada produto percorre a linha inteira e visita cada estação uma única vez. A peça é colocada numa esteira transportadora e transportada de estação para estação e, em cada uma delas, uma parte do trabalho total necessário para finalizar o produto é realizada (SCHOLL, 1999). O arranjo destas estações requer que os processos sejam agrupados de forma a maximizar a eficiência da linha.

A FMC usada para os estudos possui um *layout* já definido e, por este motivo, o balanceamento da produção neste trabalho consiste em definir qual máquina deve realizar cada etapa da produção de cada peça, minimizando o tempo de ciclo<sup>12</sup> (SALBP-1 ou MALBP-1).

Segundo Becker e Scholl (2006), para executar as etapas da produção devem ser observadas as restrições de precedência, que podem ser visualizadas no exemplo indicado na tabela 2.2 e melhor representadas em um gráfico de precedência. A figura 2.2 mostra um exemplo de um gráfico de precedência de uma peça que possui 10 etapas de produção cada qual com um tempo de execução diferente.

Na figura 2.2 pode-se verificar que as etapas dois, seis e sete não podem ser iniciadas enquanto a etapa um não terminar. No entanto, as etapas três, quatro e cinco necessitam que a etapa dois tenha sido completada. Para a etapa oito são necessárias que as etapas três, quatro e cinco, todas elas, tenham sido finalizadas. A etapa nove tem como requisito apenas que a etapa oito seja finalizada e a etapa final somente pode ser iniciada quando as etapas seis, sete e nove estiverem completas.

Deve-se verificar também se existem restrições em cada etapa de fabricação de cada peça, por exemplo, se uma etapa da produção de um determinado produto só pode ser realizada na máquina fresadora e não é possível executá-la no torno. Ou seja, um rasgo de chaveta não pode ser realizado no torno, apenas na fresadora. Portanto, essa etapa de fabricação é atribuída necessariamente à fresadora.

---

<sup>12</sup> Neste trabalho, tempo de ciclo é definido como o maior tempo necessário para o processamento de todas as tarefas alocadas a um posto de trabalho. O tempo de ciclo será comum a todos os postos de trabalho

Tabela 2.2 – Exemplo de restrições de precedência (SCHOLL e VOSS, 1996)

Tarefa	Tempo de execução	Precedência	Tarefa	Tempo de execução	Precedência
1	09 min	-	6	08 min	1
2	01 min	1	7	06 min	1
3	02 min	2	8	02 min	3, 4, 5
4	02 min	2	9	04 min	8
5	03 min	2	10	05 min	6, 7, 9

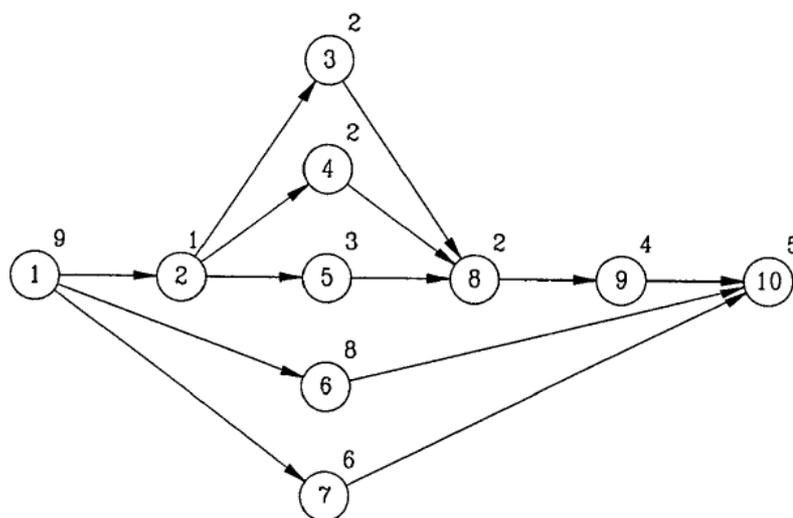


Figura 2.2 – Exemplo de um gráfico de precedência (SCHOLL e VOSS, 1996)

Para o problema de balanceamento, diferentes funções objetivos são propostas por diversos autores. A função objetivo pode reduzir o custo total do processo de fabricação, reduzir o tempo de ciclo das estações de trabalho, maximizar a eficiência da linha ou reduzir o tempo de máquina parada. Klein e Scholl (1996) utilizaram o procedimento *branch and bound* para reduzir o tempo de ciclo em linhas de montagem com um único modelo. Scholl e Klein (1999) maximizaram a eficiência de uma linha de montagem *just in time* em “U” utilizando um método de *branch and bound* denominado ULINO. Amen (2000) utilizou o método *exact backtracking* para resolver o problema de balanceamento minimizando o custo de produção. Becker e Scholl (2006) fizeram um estudo dos métodos para resolver problemas de balanceamento de linhas de montagem generalizadas (seleção de equipamentos e minimização de custo em linhas paralelas de montagem, linhas em “U” e produção de múltiplos modelos). Rajakumar *et al.* (2007) minimizaram o tempo de ciclo em uma linha de fabricação com máquinas em paralelo comparando os resultados obtidos utilizando o algoritmo genético e três outras estratégias de balanceamento (*random*, *shortest processing time* e *longest processing time*). Battini *et al.* (2009) utilizaram modelamento

matemático para resolver o problema de balanceamento e seqüenciamento de uma linha de montagem de múltiplos modelos com capacidade de *buffer* limitado. Takano *et al.* (2010) propuseram um modelo matemático capaz de resolver de forma integrada o balanceamento e o seqüenciamento da produção.

### 3 MODELAGEM DO PROBLEMA NA LITERATURA

A função objetivo capaz de otimizar os parâmetros de corte de uma máquina dentro da FMC deve ser estudada individualmente para cada etapa de fabricação de cada peça em cada máquina, pois ela vai depender do tempo de ociosidade das máquinas. Ou seja, quando o tempo de uso de uma máquina é maior comparado às outras máquinas da FMC, então essa máquina é considerada um “gargalo” na produção, pois as atividades realizadas nela serão determinantes para o tempo total de usinagem de uma peça. Por isso otimizar os parâmetros de corte dessas máquinas “gargalo” implica reduzir ao máximo o tempo de usinagem nelas, sem comprometer o acabamento da peça.

#### 3.1 Parâmetros de Corte

LEE e TARNG (2000) afirmam que reduzir o tempo de usinagem é o mesmo que reduzir o tempo total do ciclo de produção para uma peça em um torno ou fresadora com CNC, o qual pode ser dividido em três parcelas: tempo secundário, o tempo principal de produção e o tempo de troca da ferramenta. No processo de torneamento e de fresamento, o tempo total do ciclo de produção ( $T_t$ ) em minutos, para um lote de peças é dado pela equação 3.1 (SÖNMEZ *et al.*, 1999; SARAVANAN *et al.*, 2003; SARAVANAN *et al.*, 2005; WANG e LIU, 2007; SU e CHEN, 1999; STEMMER, 2001 e SANKAR *et al.*, 2007).

$$T_t = t_p + \frac{t_{setup}}{m_p} + T_s = t_p + \frac{t_{setup}}{m_p} + \text{CONSTANTE} \quad 3.1$$

onde:

$m_p$  é a quantidade de peças a serem produzidas no lote

$T_s$  é o tempo secundário, que corresponde a todos os tempos referentes aos processos que se repetem para cada peça, no caso da FMC deste estudo este tempo corresponde ao tempo de posicionamento e retirada de cada peça pelo robô e pode ser considerado uma constante [min/peça]

$t_{setup}$  é a soma dos tempos de troca de ferramenta e de *setup* da máquina para um lote de peças [min]

$t_p$  é o tempo principal de cada peça, que corresponde ao tempo efetivo de usinagem, tanto no desbaste como no acabamento [min/peça].

Nas máquinas que não são gargalo de produção da FMC, otimizar os seus parâmetros de usinagem envolve a redução de custos operacionais, considerando custos de hora máquina, custos de ferramentas, entre outros. Basicamente, minimizar os custos de fabricação pode também ser descrito como minimizar o custo de fabricação de cada peça. Segundo STEMMER (2001), o custo total de fabricação de cada peça no torneamento e no fresamento pode ser expresso por meio da equação 3.2:

$$K=K_c+K_t*\left(\frac{t_d}{T_{vd}}+\frac{t_a}{T_{va}}\right)+K_p*T_t \quad 3.2$$

onde:

- $K$  é o custo total do ciclo de produção de uma peça [\$/peça]
- $K_c$  é o custo fixo do processo, que independe da velocidade de corte, por exemplo o custo com matéria prima [\$/peça]
- $K_t$  é o custo de cada ferramenta de corte [\$/ferramenta]
- $K_p$  é o custo da hora máquina [\$/hora]
- $t_d$  é o tempo total do desbaste de cada peça [min]
- $t_a$  é o tempo total do processo de acabamento de cada peça [min]
- $T_{vd}$  é o tempo de vida da ferramenta de desbaste [min]
- $T_{va}$  é o tempo de vida da ferramenta de acabamento [min]

### 3.1.1 Restrições de Desbaste

As expressões a seguir representam as restrições utilizadas no processo de desbaste da peça, conforme SARAVANAN *et al.* (2003), SARAVANAN *et al.* (2005), WANG e LIU (2007), SU e CHEN (1999), STEMMER (2001), SANKAR *et al.* (2007), TANDON *et al.* (2002), SÖNMEZ *et al.* (1999), SHUNMUGAM *et al.* (2000), BASKAR *et al.* (2005) e BASKAR *et al.* (2006).

#### 3.1.1.1 Restrições de parâmetros de corte para o desbaste

Nesta seção são apresentadas as restrições relacionadas aos parâmetros de corte: velocidade de corte, profundidade e avanço.

- **Restrição de velocidade de corte durante o desbaste**

A velocidade de corte, segundo Stemmer (2001), “[...] é a velocidade instantânea do movimento principal, do ponto selecionado do gume em relação a peça” e é dada em [m/minuto]. Para o desbaste a velocidade de corte é indicada pelo símbolo ( $v_{cd}$ ). A velocidade de corte é limitada pela capacidade de máquina e pelo material e dimensões da ferramenta de corte. Os limites mínimos e máximos da velocidade de corte no desbaste são expressos na inequação 3.3, segundo SARAVANAN *et al.* (2003), SARAVANAN *et al.* (2005), WANG e LIU (2007), SU e CHEN (1999), SANKAR *et al.* (2007), TANDON *et al.* (2002) e SÖNMEZ *et al.* (1999).

$$v_{cdL} \leq v_{cd} \leq v_{cdU} \quad 3.3$$

onde:

$v_{cdL}$  é a velocidade mínima de corte no desbaste [m/min]

$v_{cdU}$  é a velocidade máxima de corte no desbaste [m/min]

- **Restrição de avanço durante o desbaste**

O avanço da ferramenta, segundo Stemmer (2001), é o movimento da ferramenta que tem o objetivo de provocar um deslocamento relativo entre a peça e a ferramenta, o qual, quando somado ao movimento de corte, leva à remoção de cavaco e a geração de uma geometria desejada para a peça, e é dado em [mm/revolução] pra o torno e em [mm/dente] para a fresadora. Para o desbaste, o avanço da ferramenta no torno é representado pelo símbolo ( $f_d$ ). Assim como acontece com a velocidade de corte, o avanço também é restrito pela capacidade da máquina e também pelas dimensões e material da ferramenta de corte. Os limites mínimos e máximos do avanço no desbaste são representados pela inequação 3.4, segundo SARAVANAN *et al.* (2003), SARAVANAN *et al.* (2005), WANG e LIU (2007), SU e CHEN (1999) e SANKAR *et al.* (2007).

$$f_{dL} \leq f_d \leq f_{dU} \quad 3.4$$

onde:

$f_{dL}$  é o avanço mínimo no desbaste no torno [mm/rev.]

$f_{dU}$  é o avanço máximo no desbaste no torno [mm/rev.]

No desbaste o avanço na fresadora é representada por ( $f_{zd}$ ). Os limites de avanço suportados pela máquina de fresa e pela ferramenta, segundo Tandon *et al.* (2002) e Sönmez *et al.* (1999), são representados na inequação 3.5.

$$f_{zdL} \leq f_{zd} \leq f_{zdU} \quad 3.5$$

onde:

$f_{zdL}$  é o avanço mínimo no desbaste na fresadora [mm/dente]

$f_{zdU}$  é o avanço máximo no desbaste na fresadora [mm/dente]

- **Restrição de profundidade de corte no desbaste**

A profundidade de corte, ou penetração passiva da ferramenta, segundo Stemmer (2001), “[...] é a quantidade que a ferramenta penetra na peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho” e é dada em [mm]. Para o torneamento, é indicada pelo símbolo ( $a_{pd}$ ). Como o modelo matemático pode aceitar valores impraticáveis num processo real de torneamento, a profundidade de corte é limitada pela inequação 3.6, segundo Saravanan *et al.* (2003), Saravanan *et al.* (2005), Wang e Liu (2007), Su e Chen (1999) e Sankar *et al.* (2007).

$$a_{pdL} \leq a_{pd} \leq a_{pdU} \quad 3.6$$

onde:

$a_{pdL}$  é a profundidade mínima de corte no desbaste no torno [mm]

$a_{pdU}$  é a profundidade máxima de corte no desbaste no torno [mm]

No processo de fresamento a profundidade de corte ocorre em duas direções, como mostrado na Figura 3.1. A profundidade de corte axial ( $b_{pd}$ ), ou penetração passiva da ferramenta e a profundidade de corte radial ( $d_d$ ), ou penetração de trabalho, que, segundo Stemmer (2001), “[...] é a quantidade que a ferramenta penetra na peça, medida no plano de trabalho e perpendicularmente à direção de avanço”. Ambas são dadas em [mm] e os seus limites na máquina são representados nas inequações 3.7 e 3.8.

$$b_{pdL} \leq b_{pd} \leq b_{pdU} \quad 3.7$$

$$d_{dL} \leq d_d \leq d_{dU} \quad 3.8$$

onde:

$b_{pdL}$  é a profundidade mínima de corte axial no desbaste na fresadora [mm]

$b_{pdU}$  é a profundidade máxima de corte axial no desbaste na fresadora [mm]

$d_{dL}$  é a profundidade mínima de corte radial no desbaste na fresadora [mm]

$d_{dU}$  é a profundidade máxima de corte radial no desbaste na fresadora [mm]

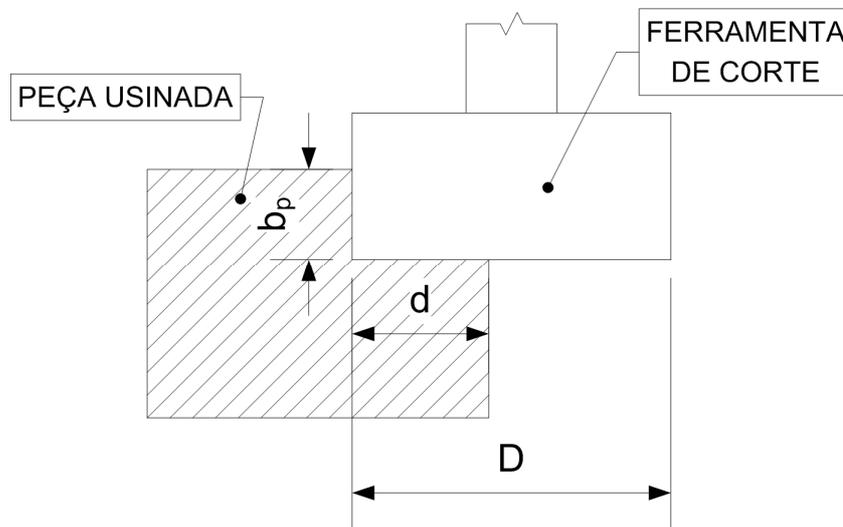


Figura 3.1 – Direções das profundidades de corte no processo de fresamento

### 3.1.1.2. Cálculo do Tempo Decorrente da Troca de Ferramenta no Desbaste

Durante o processo de usinagem, as ferramentas se desgastam durante o processo. Segundo Stemmer (2001) é fundamental definir o ponto representativo do fim da vida da ferramenta. Na prática são utilizados diversos critérios para determinar quando deve ser feita a troca da ferramenta, segundo Stemmer (2001), podem-se citar alguns exemplos de critérios que determinam o fim da vida da ferramenta: falha completa da ferramenta; falha preliminar da ferramenta; largura da marca de desgaste, no flanco; vibrações intensas; deficiência de acabamento superficial; formação de rebarbas; alteração de dimensões da peça; aumento da força de avanço; aumento da temperatura do gume.

O tempo que uma ferramenta demora para chegar ao fim da sua vida (baseando-se nos critérios de fim da vida da ferramenta) é chamado de tempo de vida da ferramenta e, segundo Stemmer (2001), esse tempo varia dependendo fundamentalmente da velocidade de corte que, para o processo de desbaste, pode ser calculado pela equação 3.9.

$$T_{vd} = \left( \frac{C_t}{v_{cd}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad 3.9$$

onde:

$C_t$  é uma constante que depende das variáveis - máquina, ferramenta e peça; seu valor é numericamente igual à velocidade de corte que dá à ferramenta a vida de um minuto

$n$  é um expoente cujo valor depende das variáveis - máquina, ferramenta e peça

Com a vida da ferramenta calculada, pode-se obter o tempo total decorrente da troca de ferramentas no desbaste de cada peça ( $t_{dfd}$ ) que, segundo STEMMER (2001), pode ser calculado pela equação 3.10.

$$t_{dfd} = \frac{t_d}{T_{vd}} * t_{tfd} \quad 3.10$$

onde:

$t_{tfd}$  é o tempo de troca de uma ferramenta no desbaste [min]

### 3.1.1.3. Cálculo da força de corte durante o desbaste

Segundo STEMMER (2001), a força de corte no processo de desbaste ( $F_{cd}$ ) para o caso de torneamento e fresamento pode ser calculada pela equação 3.11.

$$F_{cd} = k_{c1.1} * b_d * h_d^{1-mc} \quad 3.11$$

onde:

$F_{cd}$  é a força de corte durante o desbaste [N]

$h_d$  é a espessura do cavaco removido da peça usinada durante o processo de desbaste [mm], que pode ser calculado como sendo  $h = f * \text{sen}(\kappa)$ , onde  $\kappa$  é o ângulo de posição da ferramenta

- $b_d$  é a largura do cavaco removido da peça usinada durante o processo de desbaste [mm], que pode ser calculado como sendo  $b = a_p / \text{sen}(\kappa)$
- $k_{c1.1}$  é a pressão específica de corte para um cavaco de área ( $b_d * h_d$ ) igual a 1 mm<sup>2</sup> [N/mm<sup>2</sup>]
- $mc$  é uma constante que varia conforme o material da peça usinada

#### 3.1.1.4. Restrição de potência durante o desbaste

A potência de corte no desbaste ( $P_d$ ) é limitada pela capacidade do motor da máquina e, segundo STEMMER (2001), é a potência disponível no gume da ferramenta e consumida na operação de remoção de cavacos. Pode ser calculada pela inequação 3.12.

$$P_d = \frac{F_{cd} * v_{cd}}{60000} \leq P_{dU} \quad 3.12$$

onde:

$P_d$  é a potência de corte durante o processo de desbaste [kW]

$P_{dU}$  é a potência máxima de corte permitida no desbaste [kW]

Para o processo de fresamento TANDON *et al.* (2002) propõem o uso da inequação 3.13 para o cálculo da potência de corte.

$$P_d = \frac{z * v_{cd} * f_{zd} * d_d * b_{pd}}{\pi * D * v_{sd}} \leq P_{dU} \quad 3.13$$

onde:

$z$  é o número de dentes da ferramenta de corte

$D$  é o diâmetro da ferramenta de corte [mm]

$v_{sd}$  é a velocidade de avanço da mesa da fresadora [m/min]

#### 3.1.1.5. Restrição da temperatura do processo durante o desbaste

A temperatura do processo de desbaste ( $Q_d$ ) varia conforme os parâmetros de corte da máquina, porém há um limite para essa temperatura que depende do material da peça sendo usinada e da ferramenta de corte. Caso esse limite seja ultrapassado, podem ocorrer

alterações nas estruturas da peça usinada e/ou da ferramenta, alterações no acabamento superficial da peça ou danos na peça e/ou na ferramenta. Segundo SARAVANAN *et al.* (2003), SARAVANAN *et al.* (2005), SU e CHEN (1999) e SANKAR *et al.* (2007), a temperatura durante o processo de desbaste é expressa pela inequação 3.14.

$$Q_d = K_g * v_{cd}^T * f_d^\phi * a_{pd}^{\delta_1} \leq Q_{dU} \quad 3.14$$

onde:

- $Q_d$  é a temperatura durante o desbaste [°C]
- $K_g, T, \phi, \delta_1$  são constantes obtidas experimentalmente e variam conforme material da peça usinada, material da ferramenta de corte e fluido de corte
- $Q_{dU}$  é a temperatura máxima aceitável no desbaste [°C]

#### 3.1.1.6. Tempo total de desbaste

O tempo total de desbaste ( $t_d$ ) no torno depende da geometria da peça e da quantidade de material removido na usinagem. Inicialmente, nas primeiras passadas da ferramenta no tarugo, é utilizada a equação 3.15 para determinar o tempo de corte de cada passada individualmente (SU e CHEN, 1999; SANKAR *et al.*, 2007; STEMMER, 2001; SARAVANAN *et al.*, 2003; SARAVANAN *et al.*, 2005; HENRIQUES, 2006; WANG e LIU, 2007). Em seguida os tempos de todas as passadas são somados para determinar o tempo de corte da remoção inicial de material da peça no desbaste. Isso porque o desbaste consiste, basicamente, de diversas passadas horizontais, apenas realizando reduções de diâmetro na matéria prima. Um exemplo de como é realizado o desbaste pode ser visto na Figura 3.2. Na figura podem-se verificar, em linhas tracejadas, as passadas da ferramenta no desbaste. Também é possível notar o efeito “degrau” formado nas regiões anguladas e arredondadas da peça, tal efeito é removido somente na última passada da ferramenta no desbaste.

A última passada da ferramenta de corte no desbaste, segundo SU e CHEN (1999), tem seu tempo determinado somando-se os tempos de corte individuais de cada região da peça final desejada, que é calculado, conforme a sua geometria, por uma das equações (3.15, 3.16, 3.18 ou 3.19), considerando que, por se tratar da operação de desbaste, é deixada uma quantidade de material para a operação de acabamento.

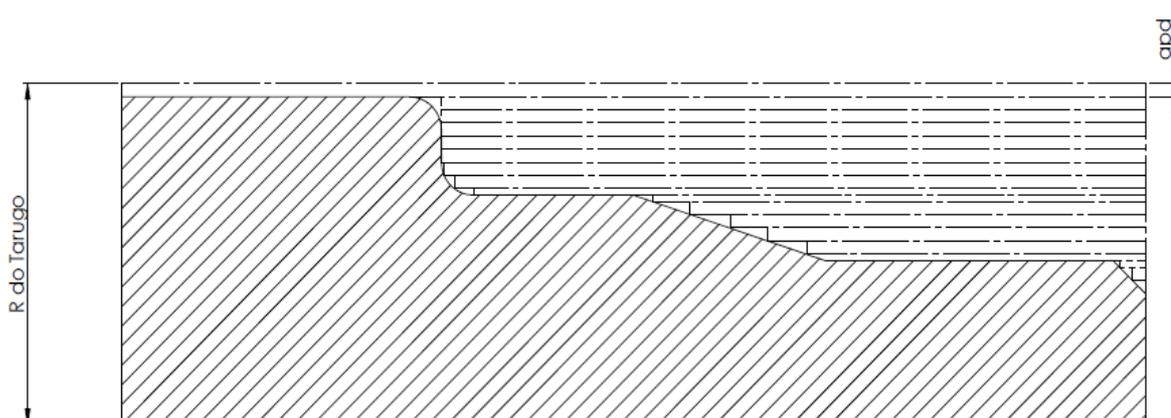


Figura 3.2 – Exemplo da remoção de material no desbaste para torneamento cilíndrico externo.

Para regiões de corte linear, onde a ferramenta se movimenta apenas no sentido do eixo do cabeçote da máquina, é utilizada a equação 3.15 para calcular o tempo de corte linear ( $t_{ld}$ ).

$$t_{ld} = \frac{\pi * d * l}{1000 * v_{cd} * f_d} \quad 3.15$$

onde:

$d$  é o diâmetro obtido após a remoção do material [mm]

$l$  é o comprimento desejado da região usinada [mm]

Para determinar o tempo de corte no faceamento do tarugo e da superfície transitória da peça ( $t_{fd}$ ), onde a ferramenta se movimenta apenas no sentido perpendicular ao eixo do cabeçote da máquina, é utilizada a equação 3.16 (SU e CHEN, 1999).

$$t_{fd} = \frac{\pi}{1000 * v_{cd} * f_d} |x_2^2 - x_1^2| \quad 3.16$$

onde:

$x_1$  é o raio equivalente ao ponto inicial nos torneamentos angular, de faceamento e circular [mm]

$x_2$  é o raio equivalente ao ponto final nos torneamentos angular, de faceamento e circular [mm]

Para os cálculos dos tempos de remoção de material no torneamento linear e no torneamento circular (equações 3.18 e 3.19) é utilizado o ângulo  $\theta$ , expresso pela equação 3.17 (SU e CHEN, 1999). A Figura 3.3 mostra uma representação do torneamento angular e a Figura 3.4 mostra uma representação do torneamento circular, para melhor compreender o ângulo  $\theta$ .

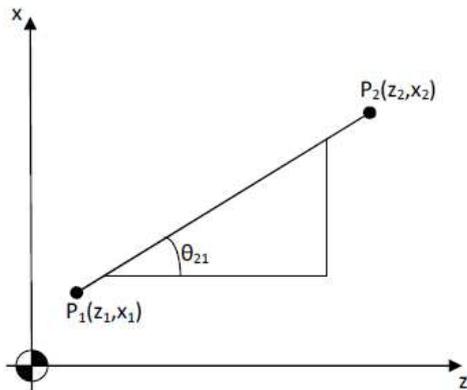


Figura 3.3 – Representação gráfica do torneamento angular.

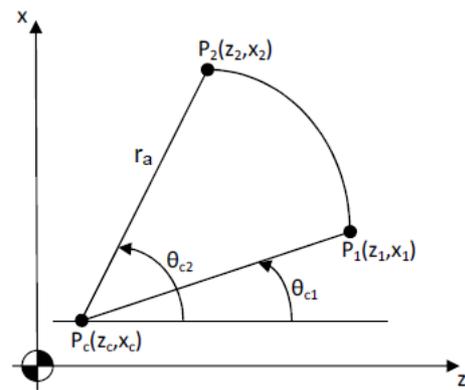


Figura 3.4 – Representação gráfica do torneamento circular.

$$\theta_{fi} = \tan^{-1} \frac{x_f - x_i}{\Delta_{fi}} \tag{3.17}$$

onde:

$\Delta_{fi}$  é o comprimento entre o ponto final e o ponto inicial da região usinada [mm]

$x_f$  é o raio equivalente do ponto final da região usinada [mm]

$x_i$  é o raio equivalente do ponto inicial da região usinada [mm]

As regiões de corte angular, onde a ferramenta se movimenta no sentido do eixo do cabeçote da máquina e, simultaneamente, no sentido perpendicular ao eixo da peça, têm seu tempo ( $t_{ad}$ ) calculado pela equação 3.18 (SU e CHEN, 1999). Note que para o torneamento angular, o ângulo  $\theta$  é utilizado e as variáveis ( $x_i$ ), ( $x_f$ ) e ( $\Delta_{fi}$ ) são substituídas, nesse caso, por ( $x_1$ ), ( $x_2$ ) e ( $\Delta_{21}$ ) respectivamente.

$$t_{ad} = \frac{\pi}{1000 * v_{cd} * f_d} \left| \frac{x_2^2 - x_1^2}{\text{sen} \theta_{21}} \right| \tag{3.18}$$

Nas regiões circulares, onde a ferramenta descreve um semicírculo ou um círculo completo, é utilizada a equação 3.19 para calcular o tempo de usinagem ( $t_{cd}$ ). Em ( $\theta_{c2}$ ) as

variáveis  $(x_i)$ ,  $(x_f)$  e  $(\Delta_{fi})$  são substituídas por  $(x_2)$ ,  $(x_c)$  e  $(\Delta_{c2})$  respectivamente. Em  $(\theta_{c1})$  as variáveis  $(x_i)$ ,  $(x_f)$  e  $(\Delta_{fi})$  são substituídas por  $(x_1)$ ,  $(x_c)$  e  $(\Delta_{c1})$  respectivamente.

$$t_{cd} = \frac{\pi * r_a}{500 * v_{cd} * f_d} \left[ x_c * (\theta_{c2} - \theta_{c1}) - r_a * (\cos \theta_{c2} - \cos \theta_{c1}) \right] \quad 3.19$$

onde:

$r_a$  é raio da superfície circular [mm]

$x_c$  é raio equivalente ao centro do raio da superfície circular [mm]

No processo de fresamento o tempo de remoção de material depende da distância percorrida pela ferramenta de corte, do diâmetro e do número de dentes da ferramenta de corte, da velocidade de corte e do avanço. A remoção de material no desbaste e no acabamento é realizada em diversas passadas da ferramenta, onde, em cada passada é removido um volume de material igual à profundidade de corte radial multiplicado pela profundidade de corte axial. Um exemplo de como é feita a remoção de material no processo de fresamento é dado na Figura 3.5. Na figura pode-se observar, em linhas tracejadas, o caminho percorrido pela ferramenta, a profundidade de corte radial e axial e o diâmetro da ferramenta.

O tempo decorrente em cada passada da ferramenta no desbaste na fresadora ( $t_{df}$ ) é expresso pela equação 3.20 (SÖNMEZ *et al.*, 1999; SHUNMUGAM *et al.*, 2000; TANDON *et al.*, 2002).

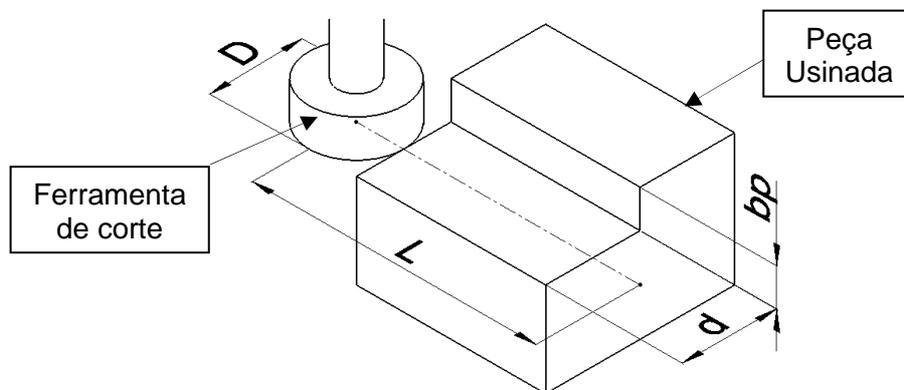


Figura 3.5 – Exemplo da remoção de material no desbaste para fresamento.

$$t_{df} = \frac{\pi * L * D}{1000 * v_{cd} * f_{zd} * z} \quad 3.20$$

onde:

$L$  é a distância percorrida pela ferramenta [mm]

### 3.1.2 Restrições de Acabamento

Na seqüência apresentam-se as restrições referentes ao processo de acabamento da peça, conforme SARAVANAN *et al.* (2003), SARAVANAN *et al.* (2005), WANG e LIU (2007), SU e CHEN (1999), STEMMER (2001), SANKAR *et al.* (2007), SHUNMUGAM *et al.* (2000), BASKAR *et al.* (2005) e BASKAR *et al.* (2006). As equações 3.21 à 3.32 são similares às expressões matemáticas 3.3 à 3.14.

#### 3.1.2.1. Restrições de parâmetros de corte durante o acabamento

Nesta seção são apresentadas as restrições relacionadas aos parâmetros de corte: velocidade de corte, profundidade e avanço.

- **Restrição de velocidade de corte durante o processo de acabamento**

A velocidade de corte no acabamento é dada em [m/minuto] e é representada pelo símbolo ( $v_{ca}$ ). Assim como no desbaste, a velocidade de corte no acabamento é também limitada pela capacidade da máquina e pelas dimensões e material da ferramenta. Esse limite, é representado, segundo SARAVANAN *et al.* (2003), SARAVANAN *et al.* (2005), WANG e LIU (2007), SU e CHEN (1999), SANKAR *et al.* (2007), TANDON *et al.* (2002) e SÖNMEZ *et al.* (1999), pela inequação 3.21.

$$v_{caL} \leq v_{ca} \leq v_{caU} \quad 3.21$$

onde:

$v_{caL}$  é a velocidade mínima de corte no acabamento [m/min]

$v_{caU}$  é a velocidade máxima de corte no acabamento [m/min]

- **Restrição de avanço durante o acabamento**

O avanço no acabamento é dado em [mm/revolução] e é representado pelo símbolo ( $f_a$ ). Os limites mínimos e máximos do avanço no acabamento, conseqüentes da capacidade do torno e da ferramenta de corte, são expressos pela inequação 3.22, segundo SARAVANAN *et al.* (2003), SARAVANAN *et al.* (2005), WANG e LIU (2007), SU e CHEN (1999) e SANKAR *et al.* (2007).

$$f_{aL} \leq f_a \leq f_{aU} \quad 3.22$$

onde:

$f_{aL}$  é o avanço mínimo durante o acabamento no torno [mm/rev.]

$f_{aU}$  é o avanço máximo durante o acabamento no torno [mm/rev.]

Para a fresadora o avanço no acabamento é dado em [mm/dente] e é representado pelo símbolo ( $f_{za}$ ). Os limites do avanço suportado pela fresadora e pela ferramenta de corte são representados na inequação 3.23 (TANDON *et al.*, 2002; SÖNMEZ *et al.*, 1999).

$$f_{zaL} \leq f_{za} \leq f_{zaU} \quad 3.23$$

onde:

$f_{zaL}$  é o avanço mínimo durante o acabamento na fresadora [mm/dente]

$f_{zaU}$  é o avanço máximo durante o acabamento na fresadora [mm/dente]

- **Restrição de profundidade de corte durante o acabamento**

A profundidade de corte no acabamento é representada pelo símbolo ( $a_{pa}$ ) e é dada em [mm]. Os limites da profundidade de corte, para que não haja danos à peça usinada nem à ferramenta de corte, são representados na inequação 3.24, segundo SARAVANAN *et al.* (2003), SARAVANAN *et al.* (2005), WANG e LIU (2007), SU e CHEN (1999) e SANKAR *et al.* (2007).

$$a_{paL} \leq a_{pa} \leq a_{paU} \quad 3.24$$

onde:

$a_{paL}$  é a profundidade mínima de corte durante o acabamento no torno [mm]

$a_{paU}$  é a profundidade máxima de corte durante o acabamento no torno [mm]

A profundidade de corte no acabamento na fresadora, assim como no processo de desbaste, ocorre em duas direções (radial e axial). A inequação 3.25 define os limites da profundidade de corte radial no processo de acabamento ( $b_{pa}$ ) e a inequação 3.26 representa os limites da profundidade de corte axial no processo de acabamento ( $d_a$ ). Ambas dadas em [mm].

$$b_{paL} \leq b_{pa} \leq b_{paU} \quad 3.25$$

$$d_{aL} \leq d_a \leq d_{aU} \quad 3.26$$

onde:

$b_{paL}$  é a profundidade mínima de corte radial no acabamento na fresadora [mm]

$b_{paU}$  é a profundidade máxima de corte radial no acabamento na fresadora [mm]

$d_{aL}$  é a profundidade mínima de corte axial no acabamento na fresadora [mm]

$d_{aU}$  é a profundidade máxima de corte axial no acabamento na fresadora [mm]

### 3.1.2.2. Cálculo do tempo decorrente da troca de ferramenta no acabamento

Assim como no desbaste a ferramenta de corte utilizada no processo de acabamento superficial da peça sofre desgaste e também deve ser trocada. O tempo de vida da ferramenta de corte utilizada no processo de acabamento da peça no torno e na fresadora pode ser calculado, segundo STEMMER (2001), pela equação 3.27.

$$T_{va} = \left( \frac{C_t}{V_{ca}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad 3.27$$

Com o tempo de vida da ferramenta calculado é possível calcular o tempo que será utilizado para as trocas de ferramenta para cada peça do lote ( $t_{dfa}$ ) com a equação 3.28 (STEMMER, 2001).

$$t_{dfa} = \frac{t_a}{T_{va}} * t_{fa} \quad 3.28$$

onde:

$t_{ffa}$  é o tempo de troca de uma ferramenta no acabamento [min]

### 3.1.2.3. Cálculo da força de corte durante o acabamento

A força de corte no acabamento no torno e na fresadora pode ser obtida pela equação 3.29, segundo STEMMER (2001).

$$F_{ca} = k_{c1.1} * b_a * h_a^{1-mc} \quad 3.29$$

onde:

$F_{ca}$  é a força de corte durante o acabamento [N]

$h_a$  é a espessura do cavaco removido da peça usinada durante o processo de acabamento superficial [mm], que pode ser calculado como sendo  $h = f * \text{sen}(\kappa)$ , onde  $\kappa$  é o ângulo de posição da ferramenta

$b_a$  é a largura do cavaco removido da peça usinada durante o processo de acabamento superficial [mm], que pode ser calculado como sendo  $b = a_p / \text{sen}(\kappa)$

### 3.1.2.4. Restrição de potência durante o acabamento

A potência total do processo de acabamento, assim como no desbaste, é restrita pela capacidade do motor da máquina. Segundo STEMMER (2001), a potência de corte no processo de acabamento superficial da peça no torno pode ser calculada pela inequação 3.30.

$$P_a = \frac{F_{ca} * v_{ca}}{60000} \leq P_{aU} \quad 3.30$$

onde:

$P_a$  é a potência de corte durante o processo de acabamento [kW]

$P_{aU}$  é a potência máxima de corte permitida durante o acabamento [kW]

A potência de corte utilizada no processo de acabamento na fresadora pode ser calculada utilizando a inequação 3.31 (TANDON *et al.*, 2002).

$$P_a = \frac{z * v_{ca} * f_{za} * d_a * b_{pa}}{\pi * D * v_{sa}} \leq P_{aU} \quad 3.31$$

onde:

$v_{sa}$  é a velocidade de avanço da mesa da fresadora [m/min]

### 3.1.2.5. Restrição da temperatura da pastilha de corte durante o acabamento

A temperatura durante o processo de acabamento superficial da peça, quando ultrapassado certo limite, similarmente ao processo de desbaste, ocasiona alterações nas estruturas da peça usinada e/ou da ferramenta, alterações no acabamento superficial da peça ou danos na peça e/ou na ferramenta. Segundo SARAVANAN *et al.* (2003), SARAVANAN *et al.* (2005), WANG e LIU (2007), SU e CHEN (1999) e SANKAR *et al.* (2007), a temperatura durante o processo de desbaste é expressa pela inequação 3.32.

$$Q_a = K_g * v_{ca}^T * f_a^\Phi * a_{pa}^{\delta_1} \leq Q_{aU} \quad 3.32$$

onde:

$Q_a$  é a temperatura durante o acabamento [°C]

$Q_{aU}$  é a temperatura máxima aceitável no acabamento [°C]

### 3.1.2.6. Restrição do acabamento superficial

É importante que, além de ter uma produção rápida e econômica, a peça fabricada tenha um acabamento superficial dentro dos limites impostos pelo projeto. Um parâmetro para identificar o nível de acabamento da peça é a rugosidade máxima permitida na superfície do produto final. Segundo SARAVANAN *et al.* (2003), SARAVANAN *et al.* (2005), SU e CHEN (1999) e SANKAR *et al.* (2007) a rugosidade superficial da peça pode ser obtida pela inequação 3.33. Segundo TANDON *et al.* (2002) essa equação pode também ser utilizada no processo de fresamento.

$$\frac{f_a^2}{8r} \leq R_{máx}. \quad 3.33$$

onde:

$r$  é o raio da ponta da ferramenta de corte (mm)

$R_{m\acute{a}x}$  é a máxima rugosidade superficial permitida na peça ( $\mu\text{m}$ )

WANG e LIU (2007), SARAVANAN *et al.* (2003), SARAVANAN *et al.* (2005) e SANKAR *et al.* (2007) propõem a inequação 3.34 para garantir que a tolerância dimensional da superfície da peça no torno seja respeitada ( $\delta$ ). Na literatura não foi encontrado o uso dessa restrição no processo de fresamento, mas apenas no torneamento.

$$\delta \geq 100,66 * f_a^{0,9709} * a_{pa}^{0,4905} * v_{ca}^{0,2848} \quad 3.34$$

### 3.1.2.7. Cálculo do tempo total de acabamento

Diferente do que acontece no desbaste o corte durante o processo de acabamento ( $t_a$ ) é realizado em uma única passada da ferramenta contornando a geometria da peça desejada, assim como é feito na última passada da ferramenta de corte no desbaste, porém sem deixar sobre-metal. Portanto, o tempo de corte no processo de acabamento da peça é calculado pela somatória dos tempos decorridos de cada região da peça, que são calculados, segundo SU e CHEN (1999), pelas equações 3.35, 3.36, 3.37 e 3.38, similares às equações 3.15, 3.16, 3.18 e 3.19.

Para regiões onde há apenas o movimento linear da ferramenta, na mesma direção do eixo da peça, o tempo de movimentação da ferramenta de corte no torno ( $t_{la}$ ) é calculado, segundo SU e CHEN (1999), pela equação 3.35.

$$t_{la} = \frac{\pi * d * l}{1000 * v_{ca} * f_a} \quad 3.35$$

Para o faceamento da peça, onde a ferramenta também se movimenta linearmente em apenas uma direção, porém perpendicular ao eixo da peça usinada, a equação 3.36 é utilizada, segundo SU e CHEN (1999), para calcular o tempo decorrente da movimentação da ferramenta ( $t_{fa}$ ).

$$t_{fa} = \frac{\pi}{1000 * v_{ca} * f_a} \left| x_2^2 - x_1^2 \right| \quad 3.36$$

Regiões em que a ferramenta realiza um movimento linear em duas direções simultaneamente o cálculo do tempo de corte ( $t_{aa}$ ) é realizado utilizando a equação 3.37 (SU e CHEN, 1999). A equação 3.17 é utilizada para calcular o valor de ângulo  $\theta$ .

$$t_{aa} = \frac{\pi}{1000 * v_{ca} * f_a} \left| \frac{x_2^2 - x_1^2}{\text{sen}\theta_{21}} \right| \quad 3.37$$

Segundo SU e CHEN (1999), as regiões onde a ferramenta descreve um círculo ou um semicírculo, a equação 3.38 é utilizada para calcular o tempo total de movimentação da ferramenta de corte ( $t_{ca}$ ). A equação 3.17 é utilizada para calcular o valor de ângulo  $\theta$ .

$$t_{ca} = \frac{\pi * r_a}{500 * v_{ca} * f_a} \left| x_c * (\theta_{c2} - \theta_{c1}) - r_a * (\cos\theta_{c2} - \cos\theta_{c1}) \right| \quad 3.38$$

A equação 3.39, similar à equação 3.20, é utilizada para calcular o tempo de remoção de material de cada passada da ferramenta ( $t_{af}$ ) (SÖNMEZ *et al.*, 1999; SHUNMUGAM *et al.*, 2000; TANDON *et al.*, 2002).

$$t_{af} = \frac{\pi * L * D}{1000 * v_{ca} * f_{za} * z} \quad 3.39$$

### 3.1.3 Relações de Parâmetros

O número de vezes que a ferramenta passa pela matéria prima para obter a geometria desejada da peça ( $n_p$ ) depende da profundidade de corte, ou seja, a distância entre uma passada e outra da ferramenta. No processo de acabamento superficial a ferramenta deve passar apenas uma vez pela peça. Portanto ( $n_p$ ) é definido como sendo o número de vezes que a ferramenta de corte passa pela matéria prima removendo material no processo de desbaste e pode ser calculado, segundo SANKAR *et al.* (2007), pela equação 3.40. Considerando-se ( $a_{pt}$ ), ( $a_{pa}$ ) e ( $a_{pd}$ ) como sendo, respectivamente, profundidade de corte total, profundidade de corte no acabamento e profundidade de corte no desbaste

$$n_p = \frac{a_{pt} - a_{pa}}{a_{pd}} \quad 3.40$$

O número de passadas da ferramenta no processo de fresamento é verificado tanto no sentido radial como no axial. É necessário garantir que todo o material seja removido após as passadas da ferramenta de corte, em ambos os sentidos. Para isso são propostas as equações 3.41 e 3.42, que garantem a remoção do material, respectivamente, nos sentidos radial e axial. Note que a equação 3.41 apresenta a restrição do número de passes da ferramenta no sentido radial tanto para o desbaste ( $n_{bd}$ ) como também para o acabamento ( $n_{ba}$ ), onde ( $b_{pt}$ ) é a quantidade total de material removido no sentido radial da ferramenta. A equação 3.42 apresenta a relação entre o número de passes da ferramenta no sentido axial ( $n_d$ ) com a profundidade de corte axial total ( $d_t$ ), no desbaste ( $d_d$ ) e no acabamento ( $d_a$ ).

$$n_{bd} * b_{pd} = n_{ba} * b_{pa} = b_{pt} \quad 3.41$$

$$n_d = \frac{d_t - d_a}{d_d} \quad 3.42$$

A profundidade de corte no acabamento deve ser pequena, para evitar vibrações no sistema, melhorando, assim, o acabamento superficial da peça usinada. Por outro lado, a profundidade de corte no desbaste deve ser tal que se consiga remover a maior quantidade de material possível em menos tempo, sem que isso danifique a ferramenta ou a peça usinada. Portanto, segundo SANKAR *et al.* (2007) e VIJAYAKUMAR *et al.* (2003), para o torno é importante estabelecer como restrição ao programa que a profundidade de corte no desbaste seja sempre maior ou igual à profundidade de corte no acabamento multiplicado por uma constante ( $k_1$ ), que varia conforme a peça usinada e é obtida experimentalmente (inequação 3.43).

$$a_{pd} \geq k_1 * a_{pa} \quad 3.43$$

Na fresadora a profundidade de corte axial no desbaste é considerada, por ser mais convencional e para facilitar os cálculos, igual à profundidade de corte no acabamento,

porém para a profundidade de corte radial as dimensões variam, sendo que no acabamento a profundidade de corte deve ser menor que no desbaste. A relação entre a profundidade de corte radial no desbaste e no acabamento é dada na inequação 3.44. Note que a constante permanece a mesma da equação da relação das profundidades de corte do torno.

$$d_d \geq k_1 * d_a \quad 3.44$$

Tanto no torno como na fresadora a velocidade de corte no acabamento é mantida alta para reduzir a rugosidade superficial da peça usinada. Já no desbaste a velocidade de corte deve ser tal que seja possível aumentar a profundidade de corte para remover maior quantidade de material da matéria prima em menos tempo. Por este motivo SANKAR *et al.* (2007) e VIJAYAKUMAR *et al.* (2003) definem que a velocidade de corte no acabamento deve sempre ser maior ou igual à velocidade de corte no desbaste multiplicado por uma constante ( $k_2$ ), que varia conforme a peça usinada (inequação 3.45).

$$v_{ca} \geq k_2 * v_{cd} \quad 3.45$$

O avanço no acabamento é mantido baixo, para que a ferramenta consiga passar por todo o diâmetro da peça em todo seu comprimento. No desbaste o avanço deve ser alta para que se consiga remover a maior quantidade de material possível no menor tempo possível. Então, SANKAR *et al.* (2007) e VIJAYAKUMAR *et al.* (2003) sugerem que o avanço no desbaste deve sempre ser maior ou igual ao avanço no acabamento multiplicado por uma constante ( $k_3$ ), que depende da peça usinada (inequação 3.46).

$$f_d \geq k_3 * f_a \quad 3.46$$

## 3.2 Seqüenciamento da Produção

Para resolver problemas de seqüenciamento da produção em uma FMC é utilizado o mesmo modelo matemático que é aplicado a linhas de produção do tipo *Flow Shop*, ou seja, toda peça produzida passa por uma mesma seqüência de produção, visitando cada estação de trabalho uma única vez. Outras características que, segundo GUÉRET *et al.* (2000), devem ser observadas são, o fato de que cada máquina só consegue produzir uma peça de

cada vez e a limitação de que uma peça não pode passar para a estação de trabalho seguinte enquanto a peça anterior estiver sendo manufaturada em uma máquina.

Existem diversos modelos na literatura capazes de resolver problemas de seqüenciamento de uma linha de produção do tipo *Flow Shop*. No item 3.5.1 é revisado o modelamento proposto por GUÉRET *et al.* (2000). No item 3.5.2 é revisado o modelamento proposto por SCHOLL (1999). Os modelos foram escolhidos pela semelhança em relação ao problema tratado no presente trabalho.

### 3.2.1 Modelo proposto por GUÉRET *et al.* (2000)

Para o modelamento é utilizada a nomenclatura *MAQ*, onde  $MAQ = \{1, \dots, NM\}$ , para definir o número total (NM) de máquinas (*m*) e *TAR*, onde  $TAR = \{1, \dots, NT\}$ , para definir o número total (NT) de tarefas (*t*) que devem ser realizadas para completar a produção de todas as peças. O tempo de usinagem da tarefa (*t*) na máquina (*m*) é definido como  $DUR(m,t)$ .

GUÉRET *et al.* (2000) sugerem a utilização da variável binária  $rank(t,k)$ , que será igual a um quando a tarefa *t* for executada na posição *k* na seqüência de produção; caso contrário,  $rank(t,k)$  terá valor zero. O número total de posições de início (RANKS) é o mesmo que o número de tarefas, pois cada tarefa deve ser alocada em uma única posição na seqüência de produção. Essa restrição, segundo GUÉRET *et al.* (2000), pode ser definida pela equação 3.47. Ainda, cada posição na seqüência de produção deve ser ocupada por apenas uma tarefa, que, segundo GUÉRET *et al.* (2000), é restrito pela equação 3.48.

$$\sum_{t \in TAR} rank(t,k) = 1 \quad \forall k \in RANKS \quad 3.47$$

$$\sum_{k \in RANKS} rank(t,k) = 1 \quad \forall t \in TAR \quad 3.48$$

É necessário ainda considerar o tempo em que a máquina fica parada. Para isso são usadas as variáveis  $empty(m,k)$  e  $wait(m,k)$ , ambas não negativas. A variável  $empty(m,k)$  (onde *m* está contido em *MAQ* e *k* varia de um a  $NT-1$ ) representa o tempo que a máquina *m* fica parada (ou ociosa), após concluir o processamento da peça na posição *k* da seqüência de produção, esperando o início do processamento da peça na posição *k+1* (enquanto o processamento desta peça na máquina anterior [*m-1*] não for concluído). Por

este motivo, segundo GUÉRET *et al.* (2000), esta variável é nula para todas as posições  $k$  na primeira máquina do processo (equação 3.49).

$$empty(1,k) = 0 \quad \forall k = 1, \dots, NT - 1 \quad 3.49$$

Já a variável  $wait(m,k)$  (onde  $m$  varia de um a  $NM-1$  e  $k$  está contido em  $RANKS$ ) representa o tempo que a máquina  $m$  fica parada, após processar a peça na posição  $k$ , esperando a máquina seguinte ( $m+1$ ) liberar a peça anterior ( $k-1$ ) para que ela (máquina  $m+1$ ) possa iniciar o processamento da peça na posição  $k$ . A primeira peça produzida no processo de manufatura pode passar por todas as máquinas sem esse tempo de espera, já que não haverá uma peça na posição  $k-1$ . Então, segundo GUÉRET *et al.* (2000), esta variável será nula para a primeira posição de início ( $k$ ) em todas as máquinas (equação 3.50).

$$wait(m,1) = 0 \quad \forall m = 1, \dots, NM - 1 \quad 3.50$$

Um ponto bastante importante é relacionar as variáveis  $wait(m,k)$  e  $empty(m,k)$  com a variável  $rank(t,k)$ . A Figura 3.6 mostra um exemplo de uma transição entre peças em uma máquina e de uma peça entre máquinas, auxiliando na formulação da expressão que define a relação entre as variáveis.

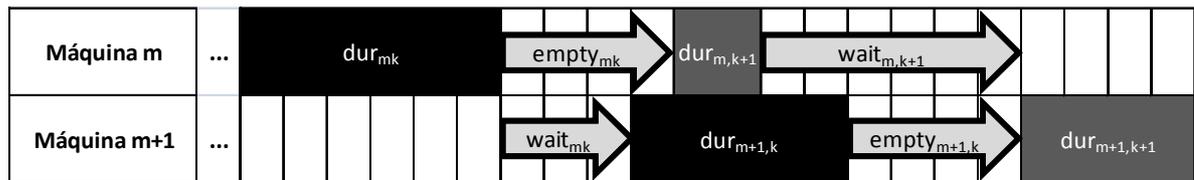


Figura 3.6 – Representação das variáveis  $empty(m,k)$  e  $wait(m,k)$ . (Adaptado de GUÉRET *et al.*, 2000).

Segundo GUÉRET *et al.* (2000) a relação entre as variáveis  $wait(m,k)$  e  $empty(m,k)$  com a variável  $rank(t,k)$  pode então ser escrita como na equação 3.51.

$$empty(m,k) + wait(m,k+1) + \sum_{t \in TAR} DUR(m,t) * rank(t,k+1) =$$

$$wait(m,k) + empty(m+1,k) + \sum_{t \in TAR} DUR(m+1,t) * rank(t,k)$$

$$\forall m = 1, \dots, NM - 1; k = 1, \dots, MT - 1 \quad 3.51$$

GUÉRET *et al.* (2000) definem como função objetivo minimizar o tempo de início da primeira peça na seqüência na última máquina, somado com o tempo de máquina parada ( $empty(m,k)$ ). Para simplificar a formulação, GUÉRET *et al.* (2000) introduzem uma nova notação  $dur(m,k)$  (equação 3.52), que é a duração da peça de posição de início  $k$  na máquina  $m$ . Com isto é possível definir a função objetivo como descrita na equação 3.53.

$$dur(m,k) = \sum_{t \in TAR} DUR(m,t) * rank(t,k) \quad \forall m \in MAQ; k \in RANKS \quad 3.52$$

$$\begin{aligned} \text{Minimizar: } \sum_{m=1}^{NM-1} dur(m,1) + \sum_{k=1}^{NT-1} empty(NM,k) = \\ \sum_{m=1}^{NM-1} \sum_{t \in TAR} DUR(m,t) * rank(t,1) + \sum_{k=1}^{NT-1} empty(NM,k) \end{aligned} \quad 3.53$$

### 3.2.2 Modelo proposto por SCHOLL(1999)

Em seu livro, SCHOLL (1999) faz seu estudo em uma linha de montagem onde o componente a ser montado é colocado em uma esteira e passa pelas diversas estações de trabalho. O comprimento da esteira e o tempo de cada estação de trabalho são conhecidos, assim como o tempo de montagem de cada componente. É também considerado no problema que em alguns casos especiais possa ocorrer sobre-carregamento de uma estação de trabalho, ou seja, eventuais trabalhos possam ser concluídos fora da linha de montagem, no caso de uma operação exceder o tempo dessa determinada estação de trabalho. Outra importante diferença deste problema com o problema proposto por GUÉRET *et al.* (2000) é a demanda, pois no estudo proposto por SCHOLL (1999) cada componente possui uma demanda diferente, enquanto GUÉRET *et al.* (2000) propunha a produção de apenas uma peça de cada modelo.

SCHOLL (1999) define que a melhor função objetivo para o problema é minimizar o número de sobre-carregamentos durante a linha de montagem, que é definido como na equação 3.54.

$$\text{Minimizar: } WO = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I w(k,i) \quad 3.54$$

onde:

$WO$  é o tempo total de sobre carregamento, ou *work overload* [min]

$w(k,i)$  é o tempo de sobre carregamento da peça de posição ( $i$ ) da seqüência na estação de trabalho ( $k$ ) [min]

$k$  é a estação de trabalho

$i$  é a posição do modelo na seqüência

Para garantir que cada peça é colocada em apenas uma posição de início da seqüência, SCHOLL (1999) utiliza as expressões matemáticas 3.55 e 3.56.

$$\sum_{m=1}^M x(m,i) = 1 \quad \forall i = 1, \dots, I \quad 3.55$$

$$x(m,i) \in \{0,1\} \quad 3.56$$

onde:

$m$  é o modelo do produto montado

$$x(m,i) \text{ é uma variável binária, = } \begin{cases} 1 & \text{Se uma unidade do modelo (} m \text{) estiver} \\ & \text{alocada à posição de início (} i \text{)} \\ 0 & \text{Caso contrário} \end{cases}$$

A equação 3.57 garante que a demanda de todos os modelos de produto seja atendida.

$$\sum_{i=1}^I x(m,i) = d(m) \quad \forall m = 1, \dots, M \quad 3.57$$

onde:

$d(m)$  é a demanda total do modelo de peça ( $m$ )

Para facilitar os cálculos e simplificar as equações, SCHOLL (1999) define o tempo de operação da peça na posição da seqüência ( $i$ ) na estação ( $k$ ) como  $\rho(k,i)$  (equação 3.58).

$$\rho(k,i) = \sum_{m=1}^M \tau(m,k) * x(m,i) \quad \forall i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K \quad 3.58$$

onde:

$\tau(m, k)$  é o tempo de processamento de uma unidade do modelo  $m$  na estação  $k$  [min]

Uma operação não pode ser iniciada antes que a operação anterior tenha sido completada, bem como ela não pode ter seu início antes do tempo zero e nem ter um tempo de sobre carregamento negativo. SCHOLL (1999) define estas restrições com as inequações 3.59 e 3.60.

$$s(k, i+1) \geq s(k, i) + p(k, i) - w(k, i) - c \quad \forall i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K \quad 3.59$$

$$s(k, i) \geq 0, w(k, i) \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K \quad 3.60$$

onde:

$s(k, i)$  é o tempo de início da peça de posição  $i$  da seqüência na estação  $k$  [min]

$c$  é o intervalo fixo de tempo de lançamento das peças na esteira, ou tempo de ciclo [min]

O tempo de processamento da peça não pode exceder o tempo total disponível em cada estação de trabalho. Esta restrição é definida por SCHOLL (1999) pela inequação 3.61.

$$s(k, i) + p(k, i) - w(k, i) \geq l(k) \quad \forall i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K \quad 3.61$$

onde:

$l(k)$  é o tempo total disponível para a estação  $k$  (comprimento físico / velocidade da esteira) [min]

A equação 3.62 garante que, segundo SCHOLL (1999), a linha esta em seu estado inicial antes e depois da produção de cada unidade.

$$s(k, 1) = 0, s(k, I+1) = 0 \quad \forall k = 1, \dots, K \quad 3.62$$

### 3.3 Balanceamento da Produção

O *layout* da FMC estudada é bastante rígido, por este motivo o balanceamento da produção neste trabalho apenas define a máquina onde cada etapa da fabricação será executada (no torno ou na fresadora), para, assim, aliviar a máquina “gargalo” e reduzir o tempo de máquina parada. Este tipo de balanceamento, onde o número de máquinas já é conhecido e pretende-se minimizar o tempo de ciclo, é conhecido como SALBP-2 para

linhas de montagem com um único produto ou MALBP-2 para linhas de montagem com mais de um produto (SCHOLL, 1996; KLEIN e SCHOLL, 1996; BECKER e SCHOLL, 2006; SCHOLL e BECKER, 2006).

Como descrito na seção 2.4 existem diferentes possíveis funções objetivos para o problema de balanceamento da produção. A equação 3.63 apresenta a função objetivo capaz de minimizar a soma das diferenças entre o tempo de ciclo e os tempos de utilização das estações de trabalho proposta por BATTINI *et al.* (2009). A função objetivo foi escolhida pela semelhança entre o problema proposto por BATTINI *et al.* (2009) com o proposto no presente trabalho.

$$\text{Minimizar : } F = \sum_{k=1}^K \left( c - \sum_{j=1}^J X(j,k) * t(j) \right) \quad 3.63$$

onde:

$F$  é a soma das diferenças entre o tempo de ciclo e os tempos de utilização das estações de trabalho [min]

$k$  é o número da estação de trabalho

$c$  é o tempo de ciclo [min]

$j$  número da operação

$X(j,k)$  é uma variável binária, =  $\begin{cases} 1 & \text{Se a operação } j \text{ for designada à estação de} \\ & \text{trabalho } k \\ 0 & \text{Caso contrário} \end{cases}$

$t(j)$  tempo de execução da operação  $j$

Todas as operações devem ser realizadas uma única vez durante o processo de montagem do produto. Para garantir que isso aconteça utiliza-se a restrição apresentada na equação 3.64 (RAJAKUMAR *et al.*, 2007; BATTINI *et al.*, 2009).

$$\sum_{k=1}^K X(j,k) = 1 \quad \forall j = 1, \dots, J \quad 3.64$$

A inequação 3.65 garante que a soma dos tempos de todos os processos de cada máquina não exceda o tempo de ciclo (SCHOLL e KLEIN, 1999; AMEN, 2000; BECKER e SCHOLL, 2006; RAJAKUMAR *et al.*, 2007; BATTINI *et al.*, 2009).

$$\sum_{j=1}^J X(j,k) * t(j) \leq c \quad \forall k = 1, \dots, K \quad 3.65$$

Para garantir que o gráfico de precedência (Figura 2.2) será respeitado, a restrição apresentada na inequação 3.66 é utilizada (KLEIN e SCHOLL, 1996; AMEN, 2000; BATTINI *et al.*, 2009).

$$E(j) \leq k(X(j,k)) \leq L(j) \quad \forall k = 1, \dots, K; j = 1, \dots, J \quad 3.66$$

onde:

$E(j)$  é o número da estação de trabalho da peça que antecede a operação  $j$

$L(j)$  é o número da estação de trabalho da peça que sucede a operação  $j$

$k(X(j,k))$  é o valor do índice  $k$  para quando  $X(j,k)$  for igual a 1

## 4 METODO PROPOSTO

O presente trabalho apresenta uma nova visão da otimização em uma célula flexível de manufatura, onde o balanceamento, o seqüenciamento e a definição dos parâmetros de corte são considerados como sendo um único problema. Todos os trabalhos e artigos pesquisados pelo autor tratam separadamente esses problemas, criando modelos matemáticos capazes de otimizar apenas os parâmetros de corte ou o balanceamento e/ou o seqüenciamento da produção, mas nunca os três simultaneamente. Portanto, este trabalho apresenta um estudo inovador de solução de problemas de otimização de linhas de produção.

A proposta deste trabalho foi criar duas abordagens para otimizar uma célula flexível de manufatura, que não consideram os problemas de definição dos parâmetros de corte, do seqüenciamento e do balanceamento da produção como problemas isolados. Para isto propõe-se que a otimização da produção seja dividida em três etapas seqüenciais.

- **1ª abordagem (sem considerar o balanceamento da produção):**

As três etapas desta abordagem são:

- i. Otimizar os parâmetros de usinagem a fim de se obter o menor tempo para fabricação, conforme indicado na seção 3.1;
- ii. Realizar o seqüenciamento da produção tomando os valores de tempo obtidos na primeira etapa para a base de cálculos, conforme indicado na seção 3.2;
- iii. Identificar através do gráfico de GANTT quais são as máquinas que não são gargalos da produção e, em cima dessas, aplicar a otimização dos parâmetros de usinagem, conforme indicado na seção 3.1; objetivando-se a redução de custos, para, de forma complementar, não apenas reduzir o custo da produção do lote, mas também reduzir o tempo de máquina parada. Isso foi proposto porque quando a redução de custos é aplicada a uma operação, o seu tempo de execução pode ser aumentado. Por este motivo, se a otimização de custo for aplicada às máquinas gargalos da produção, o tempo total de produção dos lotes aumenta.

- **2ª abordagem (considerando também o balanceamento da produção):**

Esta abordagem é similar à primeira, sendo que a única diferença está na segunda etapa, quando resolve-se o seqüenciamento e o balanceamento da produção,

simultaneamente. O modelo matemático proposto para a segunda etapa da 2ª abordagem é apresentado na seção 4.1. As três etapas desta abordagem são:

- i. Otimizar os parâmetros de usinagem a fim de se obter o menor tempo para fabricação, conforme indicado na seção 3.1;
- ii. Realizar o seqüenciamento e o balanceamento da produção tomando os valores de tempo obtidos na primeira etapa para a base de cálculos, conforme indicado na seção 4.1;
- iii. Identificar através do gráfico de GANTT quais são as máquinas que não são gargalos da produção e, em cima dessas, aplicar a otimização dos parâmetros de usinagem, objetivando-se a redução de custos, conforme indicado na seção 3.1.

As duas abordagens propostas foram aplicadas a uma linha de produção de acoplamentos para transmissão de movimento em motores, utilizando como *layout* a FMC da UTFPR. O problema proposto envolve tanto expressões não lineares como também variáveis inteiras. Por este motivo, pode ser caracterizado como sendo um problema não-linear inteiro misto (*mixed integer nonlinear problem* – MINLP). Um dos objetivos deste trabalho foi verificar se a abordagem proposta poderia ser resolvida usando um *software* comercial. Assim, adotou-se o *software* GAMS, responsável pela modelamento do problema, e os *softwares* CPLEX, normalmente aplicado na solução de problema LP, IP e MILP, e os *softwares* BARON e MINOS, para resolver as partes não-lineares do modelo (GAMS, 2010).

#### 4.1 Modelo Matemático do Seqüenciamento e Balanceamento de uma FMC

O modelo matemático proposto neste trabalho para a otimização dos parâmetros de corte possui duas funções objetivo. A primeira é utilizada na primeira etapa da otimização da produção do lote de peças; a segunda função objetivo é utilizada na terceira etapa do modelo. Porém, em ambos os casos, as expressões matemáticas 3.3 a 3.46 são utilizadas como restrições do modelo. Portanto a primeira etapa da otimização da produção é calculada utilizando a equação 3.1 como função objetivo e as expressões matemáticas 3.3 até a 3.46 como restrições. O cálculo do tempo mínimo de produção é realizado para cada operação de cada peça em cada máquina (torno e fresadora).

A segunda etapa da abordagem de solução consiste em resolver, de forma integrada, o seqüenciamento e o balanceamento da produção. O primeiro desafio é modelar o problema do balanceamento de forma que este seja capaz de definir as máquinas capazes

de executar as operações de manufatura das peças. Diferentemente da montagem, na fabricação existem operações que não podem ser realizadas por qualquer máquina (e.g. a usinagem de uma superfície sextavada não pode ser executada por um torno). Porém, mesmo quando uma operação pode ser executada em mais de uma máquina, o tempo de processamento pode diferir de máquina para máquina (e.g. uma operação de abertura de canal pode ser executada no torno ou na fresadora, porém os tempos de processamento serão diferentes, dependendo em qual das duas máquinas ela for realizada). Para isso é criada uma tabela denominada  $dur(m,i)$  que é a duração de processamento da operação ( $i$ ) na máquina ( $m$ ). Os resultados obtidos no primeiro passo da metodologia, ou seja, os tempos mínimos de manufatura são definidos como sendo os tempos de execução de cada operação em cada máquina. Para garantir que uma operação não seja realizada em uma máquina (caso essa máquina não seja capaz de executar essa operação em específico) é definido como tempo de processamento dessa operação nessa máquina como um número extremamente grande ( $M$  grande). Outra possibilidade é definir (ou “forçar”) que as variáveis binárias  $process(i,m,k)$  (que identificam a alocação de uma operação  $i$  numa máquina  $m$  na posição  $k$ ) tenham valor nulo, caso a máquina  $m$  não seja capaz de executar a operação  $i$ .

A equação 4.1 garante que uma determinada operação só será realizada em uma das máquinas presentes na linha de produção em uma determinada posição ( $k$ ) da seqüência se, e somente se, a peça da qual a operação pertence estiver realmente alocada à essa posição da seqüência. Para isso é criado  $oper(i,j)$  que é o conjunto de operações ( $i$ ) que pertencem à peça ( $j$ ).

$$\sum_{m=1}^M process(i,m,k) = rank(j,k) \quad \forall i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K; j = 1, \dots, J / oper(i,j) = 1 \quad 4.1$$

onde:

$$rank(j,k) \quad \text{é uma variável binária,} = \begin{cases} 1 & \text{Se a peça (j) for designada à} \\ & \text{posição (k) da seqüência} \\ 0 & \text{Caso contrário} \end{cases}$$

$$process(i,m,k) \quad \text{é uma variável binária,} = \begin{cases} 1 & \text{Se a operação (i) for designada à} \\ & \text{máquina (m) na posição (k) da} \\ & \text{seqüência} \\ 0 & \text{Caso contrário} \end{cases}$$

A equação 4.2 garante que cada operação de cada uma das peças deverá ser repetida uma vez para cada peça do lote. Por exemplo, se um produto possui uma demanda de duas peças cada operação deste produto deve ser realizada duas vezes, para, assim, manufaturar duas peças do mesmo produto.

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M process(i, m, k) = d(j) \quad \forall i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J / oper(i, j) = 1 \quad 4.2$$

onde:

$d(j)$  é a demanda da peça  $j$

O gráfico de precedência do problema é representado por  $prec(i, i')$ , que é o conjunto de operações ( $i'$ ) que devem suceder a operação ( $i$ ). Para garantir que este gráfico de precedência será respeitado é utilizada a inequação 4.3.

$$\sum_{m=1}^M m * process(i, m, k) \leq \sum_{m=1}^M m * process(i', m, k) \quad \forall k = 1, \dots, K; i = 1, \dots, I; i' = 1, \dots, I / prec(i, i') = 1 \quad 4.3$$

A equação 4.4 garante que em cada posição  $k$  da seqüência será alocada apenas uma peça e a equação 4.5 garante que todas as peças dos lotes (*i.e.* a demanda dos produtos) sejam produzidas. A equação 4.4 é a mesma apresentada nas equações 3.47 e 3.55; a equação 4.5 é a mesma apresentada na equação 3.57.

$$\sum_{j=1}^J rank(j, k) = 1 \quad \forall k = 1, \dots, K \quad 4.4$$

$$\sum_{k=1}^K rank(j, k) = d(j) \quad \forall j = 1, \dots, J \quad 4.5$$

O tempo de duração de uma determinada peça em uma determinada máquina é definido, então, pela soma dos tempos de todas as operações desta peça nessa máquina

somada com o tempo de manipulação da peça e o tempo de movimentação da ferramenta, como mostra a equação 4.6. A equação 4.6 também garante que todas as operações da peça serão realizadas pela máquina de uma só vez. Assim, nenhuma operação de outro produto será realizada na máquina enquanto todas as operações desta peça não forem concluídas.

$$dur(m, j, k) = Tmp(j, m, k) + Tmf(j, m, k) + \sum_{i=1}^I dur(m, i) * process(i, m, k)$$

$$\forall m=1, \dots, M; k=1, \dots, K; j=1, \dots, J / prec(i, ni) = true \quad 4.6$$

onde:

- $dur(m, j, k)$  é o tempo de duração da peça  $j$  de posição ( $k$ ) da seqüência na máquina  $m$  [min]
- $Tmp(j, m, k)$  é o tempo de movimentação do robô quando manipulando a peça ( $j$ ) de posição ( $k$ ) na seqüência para posicionar e removê-la de dentro da máquina ( $m$ ) [min]
- $Tmf(j, m, k)$  é o tempo de movimentação da ferramenta quando usinando a peça ( $j$ ) de posição ( $k$ ) na seqüência na máquina ( $m$ ) [min]

O tempo de manipulação da peça varia conforme o número de vezes que é necessária a movimentação da peça. Toda peça, ao iniciar a execução das suas operações em uma máquina, deve ser posicionada dentro da máquina. Portanto, deve-se somar ao tempo de execução das operações da peça na máquina o tempo de movimentação do robô. Caso seja necessário movimentar a peça durante a usinagem (e.g. para usinar a parte traseira da peça) o tempo de movimentação do robô é somado. Para os cálculos é apresentado  $manip(i, inv)$ , que é o conjunto de operações ( $inv$ ) que quando realizadas na mesma máquina que as operações ( $i$ ) exigem manipulação da peça. Cada vez que a peça é posicionada na máquina é necessário que a ferramenta se aproxime a ela para iniciar o processo de usinagem e, ao fim do processo, ela se afasta da máquina. Portanto o tempo de manipulação da peça em cada máquina é dado pela equação 4.7. Para os cálculos é considerado que o tempo para aproximar e o tempo para afastar a ferramenta são iguais.

$$Tmp(j, m, k) = (t_{mr} + 2 * t_{apx}) * MP(j, m, k)$$

$$\forall m=1, \dots, M; k=1, \dots, K; j=1, \dots, J / manip(i, inv) = 1 \quad 4.7$$

onde:

- $t_{mr}$  é uma constante que equivale ao tempo de movimentação do robô [min]
- $t_{apx}$  é uma constante que equivale ao tempo de aproximação da ferramenta na peça [min]
- $MP(j,m,k)$  é o número de vezes que a peça ( $j$ ) de posição ( $k$ ) na seqüência deve ser manipulada quando sendo usinada na máquina ( $m$ )

Cada operação de uma peça exige a utilização de uma ferramenta para ser usinada em uma máquina. As ferramentas utilizadas para a execução das operações podem ser diferentes. Quando uma operação é executada na mesma máquina que outra operação que exija ferramenta de corte diferente, é necessário acrescentar o tempo de troca de ferramenta no *magazine* da máquina, somado com os tempos de aproximação e afastamento da ferramenta em relação à peça. A equação 4.8 representa o tempo total de movimentação da peça. Para o equacionamento é apresentado  $troca(i, it)$  que é o conjunto de operações ( $it$ ) que, quando executado na mesma máquina que ( $i$ ), exige troca de ferramenta.

$$Tmf(j,m,k) = (tmud + 2 * tapx) * tfc(j,m,k) \quad \forall m=1,\dots,M; k=1,\dots,K; j=1,\dots,J / troca(i, it)=1 \quad 4.8$$

onde:

- $tmud$  é uma constante que equivale ao tempo de mudar a ferramenta no *magazine* de ferramentas da máquina [min]
- $tfc(j,m,k)$  é o número de vezes que a ferramenta de corte deve ser trocada quando a peça ( $j$ ) de posição ( $k$ ) na seqüência estiver sendo usinada pela máquina ( $m$ )

A inequação 4.9 garante que uma peça de posição ( $k$ ) do seqüenciamento não comece a ser processada em uma máquina enquanto a peça de posição ( $k-1$ ) do seqüenciamento não for concluída pela máquina. A inequação 4.10 garante que a máquina ( $m$ ) não poderá começar a processar uma peça enquanto a máquina ( $m-1$ ) não liberar a peça. A equação 4.11 garante a relação entre as variáveis  $empty(m,k)$  e  $wait(m,k)$ . A equação 4.11 é similar à equação 3.51.

$$start(m,k) \geq start(m,k-1) + \sum_{j=1}^J dur(m,j,k-1) \quad \forall k=2,\dots,K; m=1,\dots,M \quad 4.9$$

$$start(m,k) \geq start(m-1,k) + \sum_{j=1}^J dur(m-1,j,k) \quad \forall k=1,\dots,K; m=2,\dots,M \quad 4.10$$

$$empty(m,k) + wait(m,k+1) + \sum_{j=1}^J dur(m,j,k+1) =$$

$$wait(m,k) + empty(m+1,k) + \sum_{j=1}^J dur(m+1,j,k) \quad \forall k=1,\dots,K-1; m=1,\dots,M-1 \quad 4.11$$

onde:

$start(m,k)$  é o tempo de início de processamento da peça de posição  $k$  na seqüência na máquina  $m$ .

A equação 4.12 define que a primeira peça a ser colocada na linha começa a ser fabricada na primeira máquina no tempo zero. A equação 4.13 garante que a primeira máquina da linha sempre começará a processar a peça de posição  $(k+1)$  da seqüência imediatamente após concluir o processo da peça de posição  $(k)$  da seqüência (*i.e.* a variável binária  $empty(m,k)$  será igual a zero para  $m=1$ ). A equação 5.14 garante que a primeira peça a ser colocada na linha iniciará o processo na máquina  $(m+1)$  imediatamente após concluir seu processamento na máquina  $(m)$  (*i.e.* a variável binária  $wait(m,k)$  será igual a zero para  $k=1$ ). As equações 4.13 e 4.14 são as mesmas apresentadas nas equações 3.49 e 3.50 respectivamente. Quando modelando o problema no *software* GAMS, essas variáveis são fixadas como nulas, sem a necessidade das equações. Estas são apresentadas apenas por questões de entendimento.

$$start(1,1) = 0 \quad 4.12$$

$$empty(1,k) = 0 \quad \forall k=1,\dots,K \quad 4.13$$

$$wait(m,1) = 0 \quad \forall m=1,\dots,M \quad 4.14$$

A função objetivo do modelo visa reduzir o tempo total de fabricação dos lotes (*makespan*), representada pela inequação 5.15. O *makespan* ( $T_{it}$ ) é calculado pelo tempo de início da última peça a ser colocada na linha ( $K$ ) na última máquina ( $M$ ), somado com seu tempo de processamento.

$$\text{minimizar: } Ttl = start(M,K) + \sum_{j=1}^J dur(M, j, K) \tag{4.15}$$

Depois de calculados os tempos mínimos de fabricação das peças (primeira etapa do processo de otimização da produção) e realizado o balanceamento e o seqüenciamento da produção (segunda etapa do processo de otimização da produção) é desenhado o gráfico de GANTT dos resultados. Com o gráfico de GANTT é possível identificar quando cada máquina se encontra ociosa e planejar estratégias de otimização para estes períodos. Um exemplo de gráfico de GANTT pode ser visto na Figura 4.1. Na figura é possível verificar que após o processamento da peça A na máquina 1 há um tempo de peça parada (do tempo 18 ao 19) aguardando para poder ser processada pela máquina 2. Já após o processamento da peça B na máquina 2 há um tempo de máquina parada aguardando a máquina 1 liberar a peça D para poder processá-la (do tempo 11 ao 12). O mesmo acontece na máquina 3, após finalizar o processo da peça D a máquina 3 aguarda que a máquina 2 libere a peça A para poder realizar a sua última operação. Essas regiões podem ser otimizadas, de forma a reduzir o custo de fabricação e o tempo de máquina ociosa, aumentando o tempo de processamento de uma das peças na máquina, sem alterar o *makespan*. Por exemplo, aumentando-se o tempo de processamento da peça B na máquina 2 em uma unidade de tempo, será reduzido o tempo de máquina ociosa, o desgaste das ferramentas e, conseqüentemente, o número de trocas de ferramenta de corte e o tempo total de produção dos lotes não será aumentado.

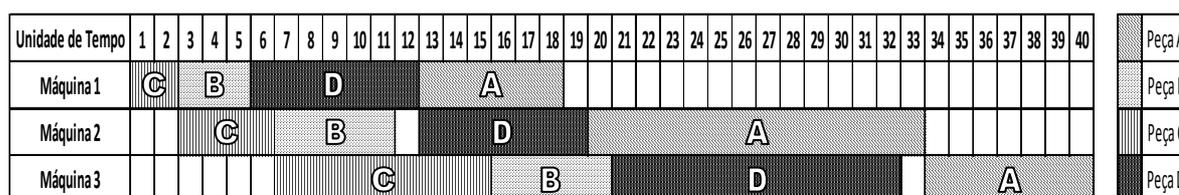


Figura 4.1 – Exemplo de um gráfico de GANTT. (TAKANO *et al.*, 2010).

Com o gráfico de GANTT é possível identificar em quais operações e máquinas devem ser aplicada a terceira etapa da otimização da produção dos lotes de peças. A terceira etapa da otimização consiste em minimizar o custo de fabricação (*i.e.* custo com trocas de ferramenta de corte), porém, o tempo máximo de máquina deve ser limitado, de forma a não alterar o *makespan*. Para minimizar o custo de fabricação é utilizada a equação 3.2 como função objetivo e as expressões matemáticas 3.3 à 3.46 como restrições do problema. A equação 3.1 é usada para calcular o novo tempo de processamento da operação na máquina, esse tempo de duração é limitado (*e.g.* para o exemplo apresentado

no gráfico de GANTT, para se reduzir o custo de fabricação da peça B na máquina 2 o tempo de processamento deve ser limitado a seis unidades de tempo).

## 5 RESULTADOS

Para a validação das abordagens é proposto um problema onde, utilizando a FMC da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, que se encontra no Laboratório de Automação e Sistemas Inteligentes de Manufatura (LASIM) nas dependências da UTFPR, campus Curitiba, na sala A-007, são fabricados acoplamentos para transmissão de movimento em motores. A Figura 5.1 ilustra a FMC considerada, identificando suas partes principais.

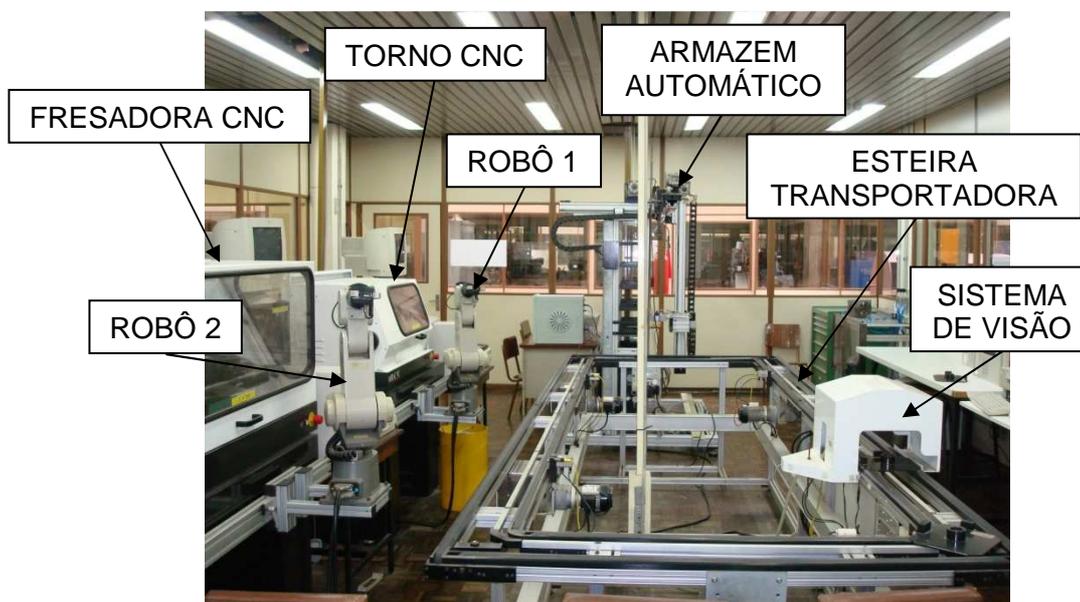


Figura 5.1 – Foto da FMC da UTFPR no LASIM

A FMC da universidade possui um *layout* definido e rígido como pode ser visto no esquema simplificado, elaborado com o *software* “*Flexsim*” (FLEXSIM, 2009), indicado na Figura 5.2. Nessa figura pode-se verificar a presença, na FMC da universidade, de um armazém automático de peças (AS/RS<sup>13</sup>), onde ficam armazenadas as matérias primas que serão usinadas e também as peças finalizadas. O AS/RS consiste de um robô cartesiano que manipula as peças que entram e saem do armazém. A FMC é composta, ainda, por uma esteira transportadora (que leva a matéria prima de uma estação de trabalho a outra), um sistema de visão que inspeciona as peças prontas, e duas estações de trabalho. A primeira delas com um torno com comando numérico computadorizado (CNC<sup>14</sup>) e a segunda com uma fresadora com CNC. Cada uma das estações possui um braço robótico para manipular as peças.

<sup>13</sup> Automated Storage and Retrieval System

<sup>14</sup> Computer Numeric Control

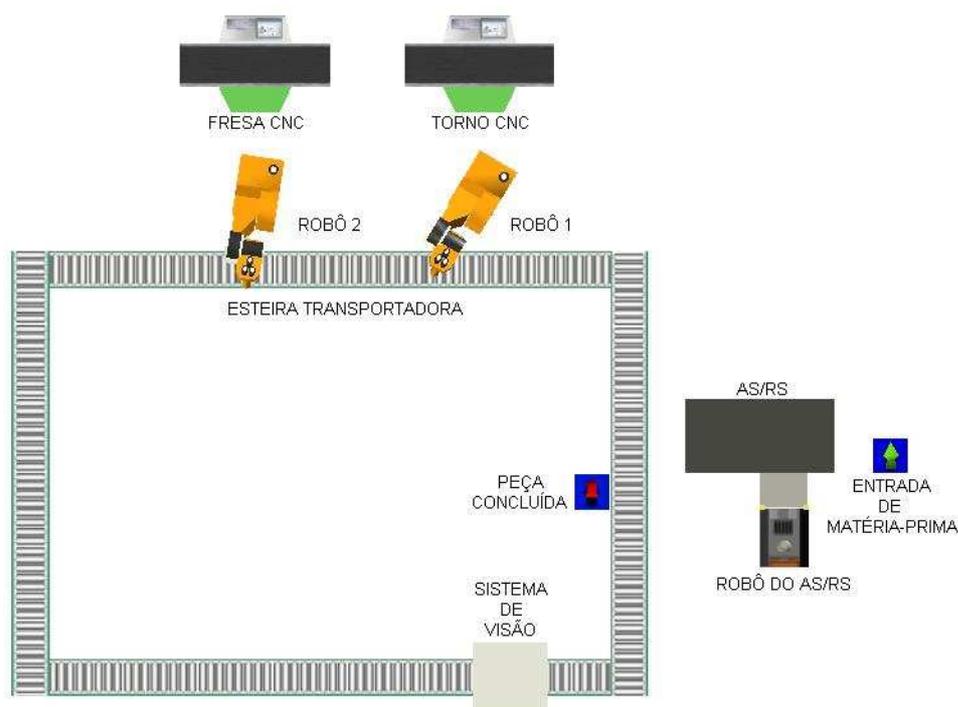


Figura 5.2 – *Layout* simplificado da FMC da UTFPR campus Curitiba (FLEXSIM, 2009)

Apenas um modelo de acoplamento será fabricado, porém em quatro tamanhos diferentes (para eixos com diâmetros de sete, dez, doze e quinze milímetros). Os acoplamentos foram codificados como AC7, AC10, AC12 e AC15 (acoplamento para eixos de diâmetro sete, dez, doze e quinze milímetros). Para o problema foi definido uma demanda de duas peças dos produtos AC7, AC10, AC12 e AC15. Para a fabricação das peças são utilizados tarugos de diâmetros 15, 21, 26 e 31 milímetros e 15, 20, 23 e 24 milímetros de comprimento, respectivamente. Os processos de desbaste e acabamento são realizados em uma única operação. Portanto, para cada produto são necessárias dez etapas de fabricação para serem manufaturadas. Os dimensionamentos e operações necessárias para a fabricação de cada peça estão disponíveis no apêndice A. As etapas de fabricação para todos os produtos são iguais, assim como também são as relações de precedência entre cada uma das operações.

O gráfico de precedência das etapas de fabricação dos produtos é mostrado na Figura 5.3. O processo de fabricação deve ser iniciado pela operação um, dois, três ou quatro. A operação seis deve aguardar o término da operação um para poder iniciar o seu processamento, assim como a operação cinco deve aguardar o fim da operação quatro. A operação nove não pode ser realizada sem antes finalizar a execução da operação sete, que, por sua vez, só pode ser executada após a operação seis. A operação dez deve

aguardar o término das operações dois e nove para iniciar seu processo, bem como a operação oito deve aguardar as operações três e quatro.

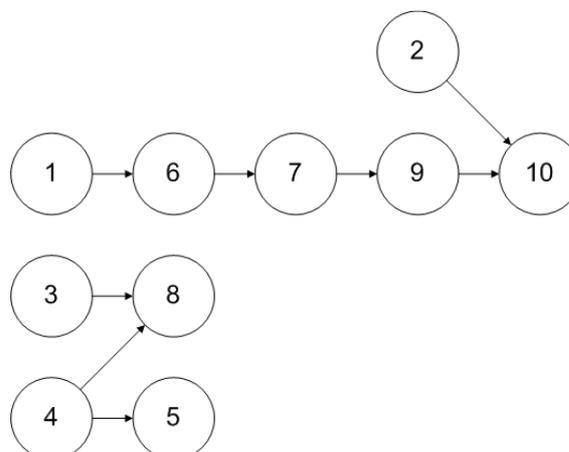


Figura 5.3 – Relações de precedência das etapas de fabricação dos produtos.

### 5.1 Minimização dos Tempos de Execução das Operações

A primeira etapa da metodologia proposta é calcular o tempo mínimo de execução de cada operação de cada uma das peças em cada uma das máquinas. Os tempos de processamento das operações no torno foram definidos utilizando o modelo matemático proposto. Os valores das constantes utilizadas nas equações são dados na Tabela 5.1. As equações, com os parâmetros da tabela, foram, então, colocadas de forma direta no *software* GAMS/CPLEX/BARON/MINOS utilizando programação não-linear inteira mista para resolver o modelo.

Tabela 5.1 – Constantes utilizadas nas equações de otimização dos parâmetros de corte.

Parâmetro/ Restrição	Valores	Parâmetro/ Restrição	Valores	Parâmetro/ Restrição	Valores
$V_{cdU}$	550 m/min	$V_{cdL}$	50 m/min	$f_{dU}$	1,0 mm/rev.
$f_{dL}$	0,2 mm/rev.	$a_{pdU}$	3,0 mm	$a_{pdL}$	0,1 mm
$V_{caU}$	550 m/min	$V_{caL}$	50 m/min	$f_{aU}$	1,0 mm/rev.
$f_{aL}$	0,2 mm/rev.	$a_{paU}$	0,1 mm	$a_{paL}$	0,3 mm
$b_{pdU}$	3,0 mm	$b_{pdL}$	0,1 mm	$b_{paU}$	3,0 mm
$b_{paL}$	0,1 mm	$d_{dU}$	1,0 mm	$d_{dL}$	0,1 mm
$d_{aU}$	0,3 mm	$d_{aL}$	0,1 mm	$C_t$	300
$n$	0,2	$k_f$	108	$\mu$	0,75
$u$	0,95	$P_{dU}$	0,74 kW	$P_{aU}$	0,74 kW
$K_q$	132	$T$	0,4	$\Phi$	0,2
$Q_{dU}$	1000 °C	$Q_{aU}$	1000 °C	$\delta$	2,0 µm
$r$	1,2 mm	$R_{max.}$	10,0 µm	$k_1$	1,2
$k_2$	1,5	$k_3$	1,2	$t_{if}$	3,0 min
$m$	1,0	$K_t$	30 \$/Ferramenta	$K_p$	1,0 \$/min

Os tempos de processamento das operações (desbaste e acabamento) obtidos para os produtos nas máquinas são mostrados nas Tabela 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5. Como as operações nove e dez podem ser executadas apenas na fresadora é usado o “*M grande*” nos tempos de processamento destas operações no torno. Outra possibilidade, que não foi testada (porque o tempo computacional com o uso do “*M grande*” foi considerado adequado), seria “forçar” que as variáveis de alocação sejam nulas nas máquinas incapazes de executar as operações nove e dez. O apêndice B apresenta os parâmetros de corte obtidos para a minimização do tempo de execução de cada operação em cada máquina.

Tabela 5.2 – Duração das operações de fabricação do acoplamento de Ø7 nas máquinas.

Produto Operação	Acoplamento Ø7									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Duração Torno CNC [min]	0,05	0,09	0,05	0,09	0,07	0,07	0,04	0,02	<i>M grande</i>	<i>M grande</i>
Custo ferramenta torno [\$]	0,10	0,19	0,10	0,19	0,15	0,05	0,08	0,01	-	-
Duração Fresadora CNC [min]	0,02	0,62	0,02	0,62	0,14	0,07	0,06	0,02	0,66	0,03
Custo ferramenta fresadora [\$]	0,02	0,63	0,02	0,63	0,16	0,05	0,09	0,02	0,52	0,02

Tabela 5.3 – Duração das operações de fabricação do acoplamento de Ø10 nas máquinas.

Produto Operação	Acoplamento Ø10									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Duração Torno CNC [min]	0,09	0,16	0,09	0,16	0,16	0,10	0,10	0,02	<i>M grande</i>	<i>M grande</i>
Custo ferramenta torno [\$]	0,17	0,32	0,17	0,32	0,33	0,08	0,16	0,02	-	-
Duração Fresadora CNC [min]	0,04	1,02	0,04	1,02	0,36	0,10	0,34	0,03	2,73	0,05
Custo ferramenta fresadora [\$]	0,03	0,99	0,03	0,99	0,41	0,08	0,35	0,02	2,14	0,04

Tabela 5.4 – Duração das operações de fabricação do acoplamento de Ø12 nas máquinas.

Produto Operação	Acoplamento Ø12									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Duração Torno CNC [min]	0,14	0,22	0,14	0,22	0,21	0,13	0,16	0,03	<i>M grande</i>	<i>M grande</i>
Custo ferramenta torno [\$]	0,24	0,44	0,24	0,44	0,43	0,10	0,24	0,02	-	-
Duração Fresadora CNC [min]	0,05	1,44	0,05	1,44	0,42	0,13	0,82	0,03	3,61	0,06
Custo ferramenta fresadora [\$]	0,04	1,44	0,04	1,44	0,48	0,10	0,75	0,03	2,83	0,04

Tabela 5.5 – Duração das operações de fabricação do acoplamento de Ø15 nas máquinas.

Produto	Acoplamento Ø15									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Duração Torno CNC [min]</b>	0,18	0,26	0,18	0,26	0,25	0,15	0,25	0,03	<i>M grande</i>	<i>M grande</i>
<b>Custo ferramenta torno [\$]</b>	0,33	0,53	0,33	0,53	0,51	0,11	0,35	0,03	-	-
<b>Duração Fresadora CNC [min]</b>	0,06	1,69	0,06	1,69	0,48	0,15	1,76	0,04	13,48	0,07
<b>Custo ferramenta fresadora [\$]</b>	0,04	1,68	0,04	1,68	0,55	0,11	1,51	0,03	10,67	0,06

## 5.2 Seqüenciamento e Balanceamento da Produção

Utilizando os resultados obtidos na primeira etapa da metodologia e usando como critério de alocação das operações nas máquinas apenas os seus tempos de execução, a alocação mais comum nas indústrias, para todas as peças, é definindo que as operações um à oito serão realizadas no torno e as duas últimas na fresadora. Isso porque é convencional alocar todas as operações de fabricação ao torno, que, de um modo geral, é mais rápido e mais barato, deixando apenas as operações que não podem ser executadas no torno para serem realizadas na fresadora.

Como definido na equação 5.6, o tempo de manufatura de cada peça em cada máquina é a soma dos tempos de todas as operações realizadas nela mais o tempo de movimentação do robô e da ferramenta. O tempo de aproximação da ferramenta na peça utilizado (*tapx*) foi de 0,07 minutos. O tempo de troca de ferramentas varia conforme a posição da ferramenta no *magazine* de peças, porém, como a diferença desses tempos é pequena e também para facilitar os cálculos, foi considerado o tempo de troca das ferramentas como uma constante (considerando o tempo máximo de troca de ferramenta). Para este caso, (*tmud*) é igual a 0,08 minutos. O tempo de manipulação da peça (*tmr*), que é o tempo que o robô demora para pegar a peça na esteira transportadora e posicionar a peça na máquina somado com o tempo que o robô demora para remover a peça da máquina e colocá-la na esteira transportadora, é de 0,53 minutos. Esse tempo é utilizado cada vez que o produto iniciar seu processamento em uma máquina e também quando as operações 3, 4, 5 ou 8 forem realizadas na mesma máquina que as operações 1, 2, 6, 7, 9 ou 10. Este procedimento exigirá que a peça seja re-posicionada dentro da máquina (*i.e.* o tempo de manipulação da peça é utilizado toda vez que houver a necessidade de posicionar a peça em uma máquina). A tabela 5.6 apresenta os resultados obtidos para o seqüenciamento da

produção (1ª abordagem proposta); considerando-se essa alocação das operações nas máquinas. A Figura 5.4 apresenta o gráfico de GANTT com os resultados.

Tabela 5.6 – Resultados obtidos aplicando apenas o seqüenciamento da produção (1ª abordagem).

	Torno	Fresadora
<b>Tempo total de máquina [minutos]</b> (Considerando tempo de robô)	<b>26,10</b>	<b>50,26</b>
<b>Tempo total de produção [minutos]</b>	<b>53,36</b>	
<b>Custo de ferramenta em cada máquina [\$]</b>	<b>14,62</b>	<b>32,64</b>
<b>Custo total das ferramentas [\$]</b>	<b>47,26</b>	

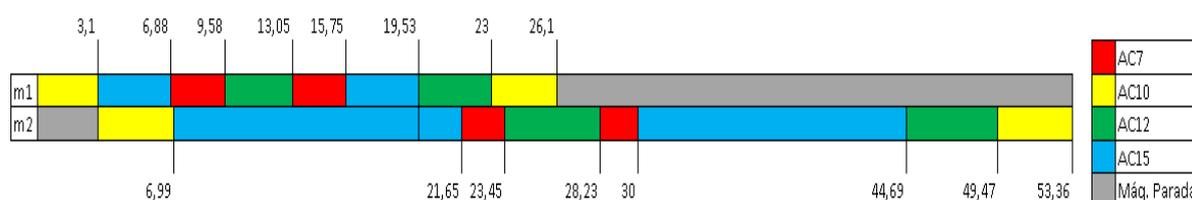


Figura 5.4 – Gráfico de GANTT dos resultados obtidos apenas com o seqüenciamento.

Neste trabalho foram realizados, de forma integrada, o seqüenciamento e o balanceamento da produção (proposto na 2ª abordagem) utilizando os tempos de processamento das operações definidos. Para isto foi utilizado o modelo matemático proposto no capítulo 4. Para os cálculos foram consideradas as máquinas (*m1* e *m2*), as quatro peças (*AC7*, *AC10*, *AC12* e *AC15*) e 10 operações para a peça *AC7* (*i11*, *i12*, *i13*, *i14*, *i15*, *i16*, *i17*, *i18*, *i19* e *i20*), 10 operações para a peça *AC10* (*i21*, *i22*, *i23*, *i24*, *i25*, *i26*, *i27*, *i28*, *i29* e *i30*), 10 operações para a peça *AC12* (*i31*, *i32*, *i33*, *i34*, *i35*, *i36*, *i37*, *i38*, *i39* e *i40*) e 10 operações para a peça *AC15* (*i41*, *i42*, *i43*, *i44*, *i45*, *i46*, *i47*, *i48*, *i49* e *i50*). A Tabela 5.7 apresenta os resultados obtidos com o seqüenciamento e com o balanceamento da produção. Note que a primeira peça a ser manufaturada (*AC7*) tem suas operações alocadas em máquinas diferentes das alocadas à mesma peça quando ela é fabricada pela segunda vez.

Os resultados obtidos foram utilizados para desenhar o gráfico de GANTT da produção (Figura 5.5). Note que, mesmo que a maior parte das operações sejam realizadas no torno, o gargalo da produção é a fresadora. O torno trabalha por 24,74 minutos e, após finalizar a execução das operações, permanece ocioso por 28,29 minutos. Portanto os parâmetros de corte das operações referentes aos produtos *AC7* (apenas da segunda peça produzida), *AC10*, *AC12* e *AC15* no torno foram redefinidos com o objetivo de reduzir o custo total de cada operação. Porém o tempo total de fabricação de cada operação deve ser limitado de forma a não exceder o tempo de espera (*wait*) da fresadora.

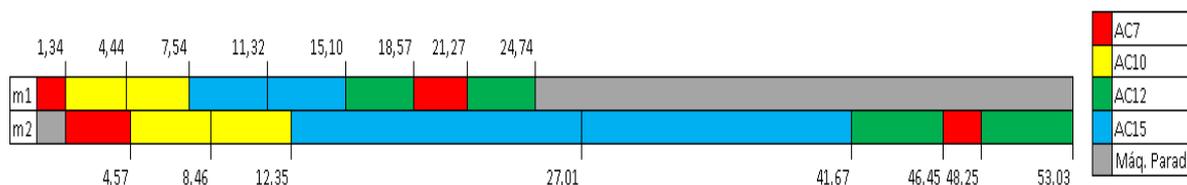


Figura 5.5 – Gráfico de GANTT dos resultados obtidos com o seqüenciamento e o balanceamento.

Tabela 5.7 – Resultado balanceamento e seqüenciamento da produção.

Posição na seqüência	Peça	Operações em cada máquina	
		m1 (torno)	m2 (fresadora)
k1	AC7	i13; i14; i15; i18	i11; i12; i16; i17; i19; i20
k2	AC10	i21; i22; i23; i24; i25; i26; i27; i28	i29; i30
k3	AC10	i21; i22; i23; i24; i25; i26; i27; i28	i29; i30
k4	AC15	i41; i42; i43; i44; i45; i46; i47; i48	i49; i50
k5	AC15	i41; i42; i43; i44; i45; i46; i47; i48	i49; i50
k6	AC12	i31; i32; i33; i34; i35; i36; i37; i38	i39; i40
k7	AC7	i11; i12; i13; i14; i15; i16; i17; i18	i19; i20
k8	AC12	i31; i32; i33; i34; i35; i36; i37; i38	i39; i40
<b>Tempo total de máquina [minutos]</b> (Considerando tempo de robô)		<b>24,74</b>	<b>51,69</b>
<b>Custo de ferramenta em cada máquina [\$]</b>		<b>14,20</b>	<b>33,43</b>
<b>Custo total das ferramentas [\$]</b>		<b>47,63</b>	

### 5.3 Minimização dos Custos de Execução das Operações

A fim de facilitar a compreensão da 3ª etapa, comum às duas abordagens propostas no capítulo 4, inicialmente exemplifica-se o seu funcionamento tomando como exemplo os resultados da 2ª etapa da 2ª abordagem proposta, que considera simultaneamente o seqüenciamento e o balanceamento da produção, como indicado na Figura 5.5.

O recálculo do tempo foi realizado primeiramente nas primeiras peças manufaturadas. Portanto, considerando-se a 2ª abordagem, a primeira peça a ter o custo de ferramenta minimizado foi a peça AC10 de posição dois no seqüenciamento. As operações da peça foram otimizadas de forma que a soma dos tempos de operação não excedesse o tempo de fabricação da peça AC7 de posição um no seqüenciamento na fresadora (*i.e.*, para este caso  $i21 + i22 + i23 + i24 + i25 + i26 + i27 + i28$  deve ser menor ou igual a  $i11 + i12 + i16 + i17 + i19 + i20$ ). Para isso foi realizada a minimização do custo das operações significativas, ou seja, que não são gargalo de produção. Portanto, a primeira operação recalculada foi a operação dois (ou *i12*) da peça AC7. Seguindo este mesmo critério, foram realizadas as otimizações dos custos das demais operações até que a soma dos tempos das operações realizadas no torno fosse igual à soma dos tempos das operações realizadas na fresadora da peça anterior. O mesmo método foi utilizado para todas as demais peças do sistema. Os

resultados obtidos nos recálculos são apresentados nas Tabela 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11. O apêndice C apresenta os valores dos parâmetros de corte das operações nas máquinas após os recálculos. As operações seis (ou seja, *i16*, *i26*, *i36* e *i46*) e oito (ou seja, *i18*, *i28*, *i38* e *i48*) de todas as peças sofreram alterações muito pequenas quando a função objetivo do modelo foi mudada para minimização do custo. Portanto, o ganho de tempo e custo para essas operações dois foi considerado nulo. Nem todas as operações da peça da segunda posição no seqüenciamento (AC10) tiveram seu custo minimizado, pois se o seu tempo de fabricação da peça no torno aumentasse, o *makespan* aumentaria também.

Tabela 5.8 – Duração das operações da peça AC10 após aplicado a minimização dos custos.

Posição na seqüência	Peça	Operações alteradas	Duração [min]	Custo [\$]	Aumento Tempo [min]	Ganho Custo [\$]	Ganho Custo [%]
k2	AC10	<i>i25</i>	0,20	0,28	0,04	0,05	<b>15,15</b>
		<i>i22</i>	0,19	0,27	0,03	0,05	<b>15,63</b>
		<i>i24</i>	0,19	0,27	0,03	0,05	<b>15,63</b>
		<i>i21</i>	0,11	0,15	0,02	0,02	<b>11,76</b>
		<i>i23</i>	0,10	0,16	0,01	0,01	<b>5,88</b>
k3	AC10	<i>i25</i>	0,20	0,28	0,04	0,05	<b>15,15</b>
		<i>i22</i>	0,19	0,27	0,03	0,05	<b>15,63</b>
		<i>i24</i>	0,19	0,27	0,03	0,05	<b>15,63</b>
		<i>i21</i>	0,11	0,15	0,02	0,02	<b>11,76</b>
		<i>i23</i>	0,11	0,15	0,02	0,02	<b>11,76</b>
		<i>i27</i>	0,11	0,14	0,01	0,02	<b>12,50</b>
		<i>i26</i>	0,10	0,08	0,00	0,00	<b>0,00</b>
<i>i28</i>	0,02	0,02	0,00	0,00	<b>0,00</b>		

Tabela 5.9 – Duração das operações da peça AC15 após aplicado a minimização dos custos.

Posição na seqüência	Peça	Operações alteradas	Duração [min]	Custo [\$]	Aumento Tempo [min]	Ganho Custo [\$]	Ganho Custo [%]
k4	AC15	<i>i42</i>	0,32	0,45	0,06	0,08	<b>15,09</b>
		<i>i44</i>	0,32	0,45	0,06	0,08	<b>15,09</b>
		<i>i45</i>	0,30	0,43	0,05	0,08	<b>15,69</b>
		<i>i47</i>	0,27	0,31	0,02	0,04	<b>11,43</b>
		<i>i41</i>	0,21	0,29	0,03	0,04	<b>12,12</b>
		<i>i43</i>	0,21	0,29	0,03	0,04	<b>12,12</b>
		<i>i46</i>	0,15	0,11	0,00	0,00	<b>0,00</b>
		<i>i48</i>	0,03	0,03	0,00	0,00	<b>0,00</b>
k5	AC15	<i>i42</i>	0,32	0,45	0,06	0,08	<b>15,09</b>
		<i>i44</i>	0,32	0,45	0,06	0,08	<b>15,09</b>
		<i>i45</i>	0,30	0,43	0,05	0,08	<b>15,69</b>
		<i>i47</i>	0,27	0,31	0,02	0,04	<b>11,43</b>
		<i>i41</i>	0,21	0,29	0,03	0,04	<b>12,12</b>
		<i>i43</i>	0,21	0,29	0,03	0,04	<b>12,12</b>
		<i>i46</i>	0,15	0,11	0,00	0,00	<b>0,00</b>
		<i>i48</i>	0,03	0,03	0,00	0,00	<b>0,00</b>

Os novos valores das durações das operações são utilizadas para redesenhar o gráfico de GANTT (indicado na figura 5.6 ). Note que, após a minimização dos custos das

operações, o tempo de ocupação do torno aumentou de 24,74 minutos (indicado na ) para 26,11 minutos (indicado na figura 5.6 ). A Tabela 5.12 apresenta a comparação dos custos de fabricação antes a após a aplicação da minimização dos custos das operações. O tempo de máquina para o torno aumentou em 5,54%, mas o *makespan* de produção permaneceu inalterado em 53,03 minutos. O custo de ferramenta no torno foi reduzido em 12,75%, o que representa 3,80% de redução no custo total das ferramentas do torno e da fresadora.

Tabela 5.10 – Duração das operações da peça AC12 após aplicado a minimização dos custos.

Posição na seqüência	Peça	Operações alteradas	Duração [min]	Custo [\$]	Aumento Tempo [min]	Ganho Custo [\$]	Ganho Custo [%]
k6	AC12	i32	0,27	0,37	0,05	0,07	15,91
		i34	0,27	0,37	0,05	0,07	15,91
		i35	0,26	0,36	0,05	0,07	16,28
		i31	0,16	0,21	0,02	0,03	12,5
		i33	0,16	0,21	0,02	0,03	12,5
		i37	0,18	0,22	0,02	0,02	8,33
		i36	0,13	0,10	0,00	0,00	0,00
k8	AC12	i32	0,27	0,37	0,05	0,07	15,91
		i34	0,27	0,37	0,05	0,07	15,91
		i35	0,26	0,36	0,05	0,07	16,28
		i31	0,16	0,21	0,02	0,03	12,5
		i33	0,16	0,21	0,02	0,03	12,5
		i37	0,18	0,22	0,02	0,02	8,33
		i36	0,13	0,10	0,00	0,00	0,00
		i38	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00

Tabela 5.11 – Duração das operações da peça AC7 após aplicado a minimização dos custos.

Posição na seqüência	Peça	Operações alteradas	Duração [min]	Custo [\$]	Aumento Tempo [min]	Ganho Custo [\$]	Ganho Custo [%]
k7	AC7	i12	0,12	0,16	0,03	0,03	15,79
		i14	0,12	0,16	0,03	0,03	15,79
		i15	0,09	0,13	0,02	0,02	13,33
		i11	0,06	0,09	0,01	0,01	10,00
		i13	0,06	0,09	0,01	0,01	10,00
		i17	0,05	0,07	0,01	0,01	12,5
		i16	0,07	0,05	0,00	0,00	0,00
		i18	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00

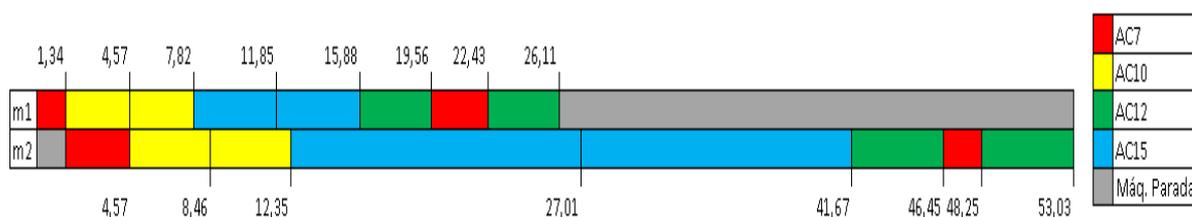


Figura 5.6 – Gráfico de GANTT dos resultados obtidos após minimização dos custos de fabricação.

### 5.3.1 Comparação entre as duas abordagens

Nesta seção são comparados os resultados das duas abordagens propostas no capítulo 4. A partir do conjunto de parâmetros de entrada gerou-se um modelo de MINLP. Alguns dados da resolução computacional, utilizando um Intel core 2 duo 2,0 GHz com 4 GB de memória RAM, são apresentados na Tabela 5.14. Os valores dos tempos computacionais na minimização do tempo de produção e na minimização do custo de fabricação colocados na tabela são referentes à soma dos tempos de execução de todas as operações de todas as peças.

Tabela 5.12 – Comparação do custo total de fabricação antes e depois da aplicação da minimização dos custos das operações.

	Máquina	Antes da minimização dos custos das operações	Após a minimização dos custos das operações	Ganho	Ganho [%]
<b>Tempo máquina [min]</b>	<b>Torno</b>	24,74	26,11	1,37	<b>5,54</b>
	<b>Fresa</b>	51,69	51,69	0,00	<b>0,00</b>
<b>Custo de ferramenta [\$]</b>	<b>Torno</b>	14,20	12,39	1,81	<b>12,75</b>
	<b>Fresa</b>	33,43	33,43	0,00	<b>0,00</b>
<b>Custo total ferramentas [\$]</b>	<b>Torno e Fresa</b>	47,63	45,82	1,81	<b>3,80</b>

A Tabela 5.13 apresenta a comparação dos custos e tempo de fabricação entre os resultados obtidos aplicando-se apenas o seqüenciamento da produção e os resultados obtidos com a aplicação do seqüenciamento e balanceamento e a minimização dos custos de fabricação. A aplicação da metodologia não apenas reduziu o tempo de fabricação dos lotes de peças em 0,62%, como também diminui o custo total despendido em compras e trocas de ferramentas em 3,05%.

Tabela 5.13 – Comparação do custo total de fabricação antes e depois da aplicação da metodologia proposta.

	Aplicando apenas seqüenciamento da produção	Aplicando seqüenciamento e balanceamento e minimização dos custos	Ganho	Ganho [%]
<b>Tempo total fabricação [min]</b>	53,36	53,03	0,33	<b>0,62</b>
<b>Custo total ferramentas [\$]</b>	47,26	45,82	1,44	<b>3,05</b>

Tabela 5.14 – Dados da resolução computacional do modelo.

	<b>Minimização do tempo de produção (total)</b>	<b>Sequenciamento e balanceamento da produção</b>	<b>Minimização do custo de fabricação (total)</b>
<b>Num. de variáveis totais</b>	19	1615	17
<b>Num. de variáveis inteiras</b>	4	672	3
<b>Num. de restrições totais</b>	17	6292	20
<b>Num. de restrições não lineares</b>	10	0	12
<b>Tempo computacional [segundos]</b>	302,55	2	4,42

## 6 CONCLUSÃO

A seguir são apresentadas as conclusões desta dissertação. Inicialmente foi apresentada uma descrição do problema de otimização do sequenciamento e balanceamento da produção com a definição simultânea dos parâmetros ótimos de usinagem (torneamento e fresamento). Neste sentido, apresentou-se uma revisão da literatura, indicando-se o equacionamento para a solução isolada de cada um dos três subproblemas (definição dos parâmetros de usinagem, sequenciamento e balanceamento da produção). Na sequência, foram propostas duas abordagens que, sequencialmente: *i)* determinam os parâmetros de torneamento e fresamento que minimizam os tempos de usinagem; *ii)* determinam o sequenciamento (e, para a 2ª abordagem, também balanceamento) da produção considerando-se a minimização do *makespan*; e *iii)* definida a sequência de produção, são determinados os parâmetros de torneamento e fresamento que minimizam os custos de usinagem, sem alterar o *makespan* obtido na segunda etapa das duas abordagens. Por fim, são discutidos e comparados os resultados obtidos para as duas abordagens. Cada produção científica desenvolvida ao longo deste mestrado (vide apêndice D) auxiliou no desenvolvimento das abordagens propostas no presente trabalho.

### 6.1 Resultados Obtidos

Tanto os modelos matemáticos para a otimização dos parâmetros de corte (minimizando o tempo ou o custo de produção de uma peça) num torno e numa fresadora como os modelos matemáticos para o sequenciamento e o balanceamento da produção foram formulados de forma que obtiveram resultados satisfatórios.

A resolução do problema abordado comprovou a eficiência dos métodos desenvolvidos, já que ambos foram solucionados dentro de um tempo computacional aceitável (igual a 48,3 segundos, como indicado na tabela 5.14). As metodologias propostas foram comparadas uma a outra. O ganho obtido com a 2ª abordagem ocorreu não apenas no tempo de processamento, como também no custo total despendido com ferramentas durante a fabricação dos lotes de peças.

No problema abordado foi considerada a fabricação de quatro produtos com demandas de duas unidades cada. O ganho de 0,62% no tempo e 3,05% nos gastos com ferramenta (Tabela 5.13) na 2ª abordagem, quando comparada à 1ª abordagem, são considerados pelo autor deste trabalho como suficientes para validar a eficiência do modelo matemático desenvolvido. Esse ganho quando estendido a uma produção em grande

escala, que é o caso em um ambiente industrial, equivale a uma redução de tempo e custos consideráveis. Infelizmente, não houve tempo hábil para comparar as duas abordagens propostas com um caso real em que os parâmetros de usinagem, a alocação das operações às máquinas e o seqüenciamento da produção costumam ser feitos empiricamente.

## 6.2 Sugestões de Continuidade

Aprimoramentos podem ser feitos como trabalhos futuros, por exemplo, incorporar no cálculo do tempo total de fabricação o tempo de movimentação da peça na esteira, para se calcular de maneira mais precisa o *makespan* da produção do lote em uma linha industrial.

Outro aprimoramento possível é possibilitar ao modelo escolher, dentre uma lista de possíveis métodos de fabricação, qual é o melhor entre eles. Por exemplo, pode-se definir no modelo que uma determinada peça pode ser fabricada ou a partir de um tarugo que será usinado em duas etapas, sendo uma frontal e outra traseira, ou a partir de um tarugo maior que será usinado de um lado apenas e, após a conclusão da manufatura, será cortada por um bedame, e deixar que o modelo matemático decida qual das duas opções é a melhor.

O modelo pode também considerar a presença de outras máquinas, para não apenas otimizar os parâmetros de corte de máquinas diferentes do torno e da fresadora, mas como também testar o modelo integrado de seqüenciamento e balanceamento da produção em um problema mais complexo, onde sejam fabricadas quantidades maiores de peças com modelos de produtos diversos.

Há também a possibilidade de considerar, no modelo matemático do seqüenciamento e balanceamento da produção, o tempo de *setup* das máquinas, que pode ainda variar conforme a seqüência de produção. Outra possível consideração é a programação de entrega das peças, que restringe o prazo de conclusão da fabricação de um determinado lote de peças. Ambas as restrições podem modificar significativamente o resultado do seqüenciamento e do balanceamento da produção.

Um novo modelo matemático pode ainda ser proposto onde realize a otimização da fabricação de lotes de peça integrando não apenas o seqüenciamento e o balanceamento da produção, mas também a escolha dos parâmetros de corte, de forma que o próprio modelo escolha quando deve otimizar o tempo de fabricação e quando deve otimizar o custo de fabricação, considerando o lucro após as vendas (custo de venda menos o custo de fabricação).

## REFERÊNCIAS

AARTS, Emile H.L.; KORST, J., 1989, "Simulated Annealing and Boltzmann Machines: a Stochastic Approach to Combinatorial Optimization and Neural Computing", Ed. Wiley, Chichester, New York, 272 p.

AMEN, Matthias. An exact method for cost-oriented assembly line balancing. *International Journal of Production Economics*, vol. 64, p. 187-195, 2000.

BARRON, R.L.; MUCCIARDI, A.N.; COOK, F.J.; CRAIG, J.N.; BARRON, A.R. Adaptive learning networks: development and application in the United States of algorithms related to GMDH, in: S.J. Farlow (Ed.), *Self-Organizing Methods in Modeling: GMDH Type Algorithms*, Marcel Dekker, New York, 1984.

BASKAR, N.; ASOKAN, P.; SARAVANAN, R.; PRABHAHARAN, G. Optimization of machining parameters for milling operations using non-conventional methods. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 25, p. 1078-1088, 2005.

BASKAR, N.; ASOKAN, P.; SARAVANAN, R.; PRABHAHARAN, G. Selection of optimal machining parameters for multi-tool milling operations using a memetic algorithm. *Journal of Material Processing Technology*, vol. 174, p. 239-249, 2006.

BASNET, C.; MIZE J. Scheduling and Control of Flexible Manufacturing Systems: A Critical Review. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 7 (6), p. 340-355, 1994.

BATTINI, Daria; FACCIO, Maurizio; PERSONA, Alessandro. Balancing-Sequencing Procedure for a Mixed Model Assembly System in Case of finite Buffer Capacity. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 44, p. 345-359, 2009

BECKER, Christian; SCHOLL, Armin A Survey on Problems and Methods in Generalized Assembly Line Balancing. *European Journal of Operational Research*, vol. 168, p. 694-715, 2006.

BOCK, Stefan; ROSENBERG, Otto; BRACKEL, Thomas Van. Controlling Mixed-Model Assembly Lines in Real-Time by Using Distributed Systems. *European Journal of Operational Research*, vol. 168, p. 880-904, 2006.

BOYD, Stephen; KIM, Seung-Jean; VANDENBERGHE, Lieven; HASSIBI, Arash. A Tutorial on Geometric Programming. *Optimization and Engineering*, vol. 8, p. 67-127, 2007

DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part B*, Vol.26, pp. 29-41, 1996.

ECKER, K.H.; GUPTA, J. N. D. Scheduling tasks on a flexible manufacturing machine to minimize tool change delays. *European Journal of Operational Research*, vol. 164, p. 627-638, 2005.

FLEXSIM Simulation Software. Version 4.0 Evaluation mode. Utah: Flexsim Software Products, Inc., 2009. 1 CD-ROM.

GAMS Integrated Development Environment. Version 2.0.33.5. Disponível em: <<http://www.gams.com>>. Acesso em: 04 ago, 2010.

GILBERT, W. W. Economics of Machining, in: *Machining Theory and Practice*, American Society for Metal, Cleveland, OH, 1950, pp. 465-485.

GLOVER, F.; LAGUNA, M., 1997, "Tabu Search", Ed. Kluwer Academic, Norwell, Massachusetts, 382 p.

GOLDBERG, D. E., 1989, "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Ed. Addison-Wesley, Boston, Massachusetts, 372 p.

GUÉRET, Chiseller; PRINS, Cristian; SEVAUX, Marc. Applications of optimization with Xpress<sup>MP</sup>. Editions Eyrolles, Paris, França, 2000.

HENRIQUES, Elsa. Towards the integration of process and production planning: an optimisation model for cutting parameters. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 28, p. 117-128, 2006.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J., 1995, "Introduction to Operations Research", Ed. McGraw-Hill, Estados Unidos, 998 p.

JERALD, J.; ASOKAN, P.; PRABAHARAN, G.; SARAVANAN, R. Scheduling optimisation of flexible manufacturing systems using particle swarm optimisation algorithm. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 25, p. 964-971, 2005.

KIM, Kwanwoo; JEONG, In-Jae. Flow shop scheduling with no-wait flexible lot streaming using an adaptive genetic algorithm. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 44, p. 1181-1190, 2007.

KLEIN, Robert; SCHOLL, Armin Maximizing the production rate in simple assembly line balancing – A branch and bound procedure. *European Journal of Operational Research*, vol. 91, p.367-385, 1996.

LEE, B. Y.; TARNG, Y. S. Cutting-parameter selection for maximizing production rate or minimizing production cost in multistage turning operations. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 105, p. 61-66, 2000.

LEE, Doo Yong.; DICESARE, Frank. Scheduling Flexible Manufacturing Systems Using Petri Nets and Heuristic Search. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 10, p. 123-132, 1994.

LOW, Chinyao; WU, Tai-Hsi; HSU, Chih-Ming. Mathematical modelling of multi-objective job shop scheduling with dependent setups and re-entrant operations. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 27, p. 181-189, 2005.

MENG, J. A. Q.; ARSECULARATNE, P. Mathew. Calculation of optimum cutting conditions for turning operations using a machining theory. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, p. 1709-1733, 2000.

RAJAKUMAR, S.; ARUNACHALAM, V. P.; SELLADURAI, V. Workflow balancing in parallel machines through genetic algorithm. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 33, p. 1212-1221, 2007.

REDDY, S. V. BHASKARA; SHUNMUGAM, M. S.; NARENDRAN, T. T. Optimal subdivision of the depth of cut to achieve minimum production cost in multi-pass turning using a genetic algorithm. *Journal of Material Processing Technology*, vol. 79, p. 101-108, 1998.

RODRIGUES, L. C. A. Notas de aula da disciplina Métodos Heurísticos, 2008.

RODRIGUES, Luiz C.; TAKANO, Mauricio I.; WIECHETECK, Rafael V. B. Analysis among three optimization techniques to set cutting parameters in turning operations. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 20., 2009, Gramado. **Anais...** Gramado: COBEM, 2009. 1 DVD.

SAIDI-MEHRABAD, Mohammad; FATTAHI, Parviz. Flexible job shop scheduling with tabu search algorithms. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 32, p. 563-570, 2007.

SANKAR, R. S.; ASOKAN, P.; SARAVANAN, R.; KUMANAN, S.; PRABHAHARAN, G. Selection of machining parameters for constrained machining problem using evolutionary computation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 32, p. 892-901, 2007.

SARAVANAN, R.; ASOKAN, P.; SACHITHANANDAM, M. Comparative analysis of conventional and non-conventional optimisation techniques for CNC turning process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 17, p. 471-476, 2001.

SARAVANAN, R.; ASOKAN, P.; VIJAYAKUMAR, K. Machining Parameters Optimization for Turning Cylindrical Stock into a Continuous Finished Profile Using Genetic Algorithm (GA) and Simulated Annealing (SA). *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 21, p. 01-09, 2003.

SARAVANAN, R.; SANKAR, R. S.; ASOKAN, P.; VIJAYAKUMAR, K.; PRABHAHARAN, G. Optimization of Cutting Conditions During Continuous Finished Profile Machining Using Non-Traditional Techniques. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 26, p. 30–40, 2005.

SAVSAR, M. Reliability Analysis of a Flexible Manufacturing Cell. *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 67, p. 147-152, 2000.

SCHOLL, Armin, 1999, "Balancing and sequencing of assembly lines", Physica-Verlag, Heidelberg, Alemanha, 318 p.

SCHOLL, Armin; BECKER, Christian. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, vol. 168, p. 666-693, 2006.

SCHOLL, Armin; KLEIN, Robert. Balancing assembly lines effectively – A computational comparison. *European Journal of Operational Research*, vol.114, p. 50-58, 1999.

SCHOLL, Armin; VOSS, Stefan. Simple assembly line balancing – Heuristic approaches. *Journal of Heuristics*, vol. 2, p. 217-244, 1996.

SHUNMUGAN, M. S.; REDDY, S. V. BHASKARA; NARENDRAN, T. T. Selection of optimal conditions in multi-pass face-milling using a genetic algorithm. *International Journal of Machine Tools and Manufacture Design, Research and application*, vol. 40, p. 401-414, 2000.

SÖNMEZ, A. I.; BAYKASOGLU, A.; DERELI, T.; FILIZ, H. Dynamic optimization of multipass milling operations via geometric programming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture Design, Research and application*, vol. 39, p.297-320, 1999.

STEMMER, Caspar E. Ferramentas de Corte I. 5. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2001. v.1. 249 p.

SU, CHAO-TON; CHEN, MU-CHEN. Computer-aided optimization of multi-pass turning operations for continuous forms on CNC lathes. *IIE Transactions*, vol. 31, p. 583-596, 1999.

TANDON, V.; EL-MOUNAYRI, H.; KISHAWY, H. NC end milling optimization using evolutionary computation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture Design, Research and application*, vol. 42, p. 595-605, 2002.

TAKANO, M. I.; RODRIGUES, L. C. A.; WIECHETECK, R. V. B. Otimização da produção de uma célula flexível de manufatura envolvendo processo de torneamento. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 6., 2010, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: CONEM, 2010. 1 DVD

TAWARMALANI, Mohit; SAHINIDIS, Nikolaos V. Convexification and global optimization in continuous and mixed-integer nonlinear programming: theory, algorithms, software, and applications. Dordrecht; Boston: Kluwer Academic Publishers, c2002. 475 p.

VIJAYAKUMAR, K.; PRABHAHARAN, G.; ASOKAN, P.; SARAVANAN, R. Optimization of multi-pass turning operations using ant colony system. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, p. 1633-1639, 2003.

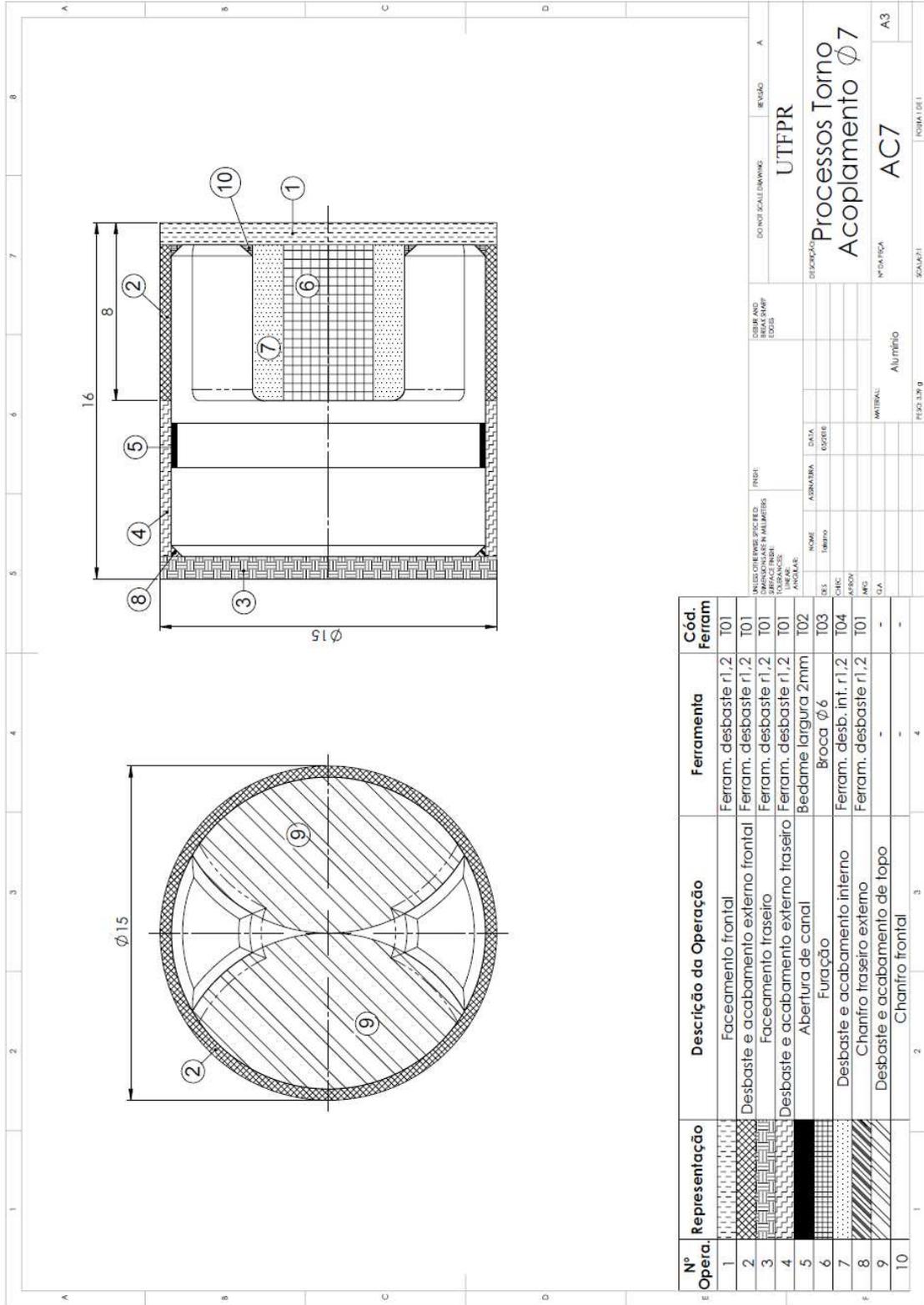
WANG, L.; ZHANG, L.; ZHENG, D.-Z. The ordinal optimisation of genetic control parameters for flow shop scheduling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 23, p. 812-819, 2004.

WANG, Rong-Tsu; LIU, Shiang-Tai. An economic machining process model with interval parameters. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 33, p. 900-910, 2007.

XIAOBO, Zhao; OHNO, Katsuhisa. Modeling for flexible manufacturing systems with an FMS blocking mechanism and a BDSM job routing. *IIE Transactions*, vol. 31, p. 957-963, 1999.

ZHOU, MengChu; DICESARE, Frank. [Petri net synthesis for discrete event control of manufacturing systems](#). *Kluwer Academic*, 1993.





Nº Opera.	Representação	Descrição da Operação	Ferramenta	Cód. Ferram
1	[Hatched pattern]	Faceamento frontal	Ferram. desbaste r1,2	T01
2	[Hatched pattern]	Desbaste e acabamento externo frontal	Ferram. desbaste r1,2	T01
3	[Hatched pattern]	Faceamento traseiro	Ferram. desbaste r1,2	T01
4	[Hatched pattern]	Desbaste e acabamento externo traseiro	Ferram. desbaste r1,2	T01
5	[Hatched pattern]	Abertura de canal	Bedame largura 2mm	T02
6	[Hatched pattern]	Furação	Broca $\phi 6$	T03
7	[Hatched pattern]	Desbaste e acabamento interno	Ferram. desb. int. r1,2	T04
8	[Hatched pattern]	Chanfro traseiro externo	Ferram. desbaste r1,2	T01
9	[Hatched pattern]	Desbaste e acabamento de topo	-	-
10	[Hatched pattern]	Chanfro frontal	-	-

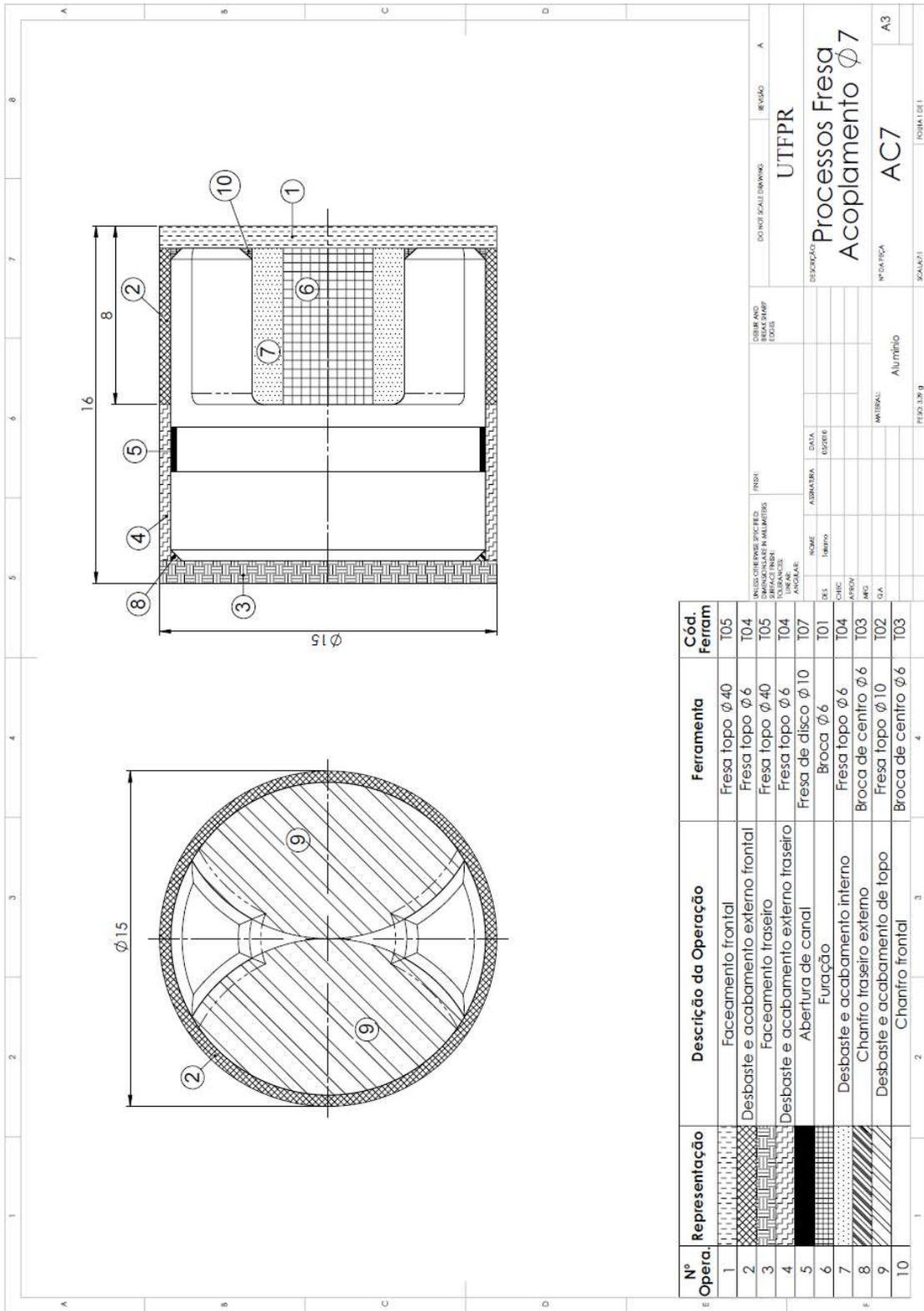
INDUSTRIAL PAPER SPECIFIED BY BRASILEIRO ABNT NBR 12230-1000  
 UNITS: DIMENSIONS IN MILLIMETERS  
 FINISH: AS SHOWN  
 NAME: [ ]  
 DESK AND INSTRUMENTS: [ ]  
 DATE: [ ]  
 DO NOT SCALE DRAWING: [ ]  
 REVISION: [ ]  
 A

UTFR

PROCESSOS TORNO  
 ACOPLAMENTO  $\phi 7$

Nº DA PEÇA: AC7  
 MATERIAL: Alumínio  
 ESCALA: 1:1  
 FOLHA DE: A3

PEÇO 3.26.9



Nº Opera.	Representação	Descrição da Operação	Ferramenta	Cód. Ferram
1	[Hatching]	Faceamento frontal	Fresa topo $\phi$ 40	T05
2	[Hatching]	Desbaste e acabamento externo frontal	Fresa topo $\phi$ 6	T04
3	[Hatching]	Faceamento traseiro	Fresa topo $\phi$ 40	T05
4	[Hatching]	Desbaste e acabamento externo traseiro	Fresa topo $\phi$ 6	T04
5	[Hatching]	Abertura de canal	Fresa de disco $\phi$ 10	T07
6	[Hatching]	Furação	Broca $\phi$ 6	T01
7	[Hatching]	Desbaste e acabamento interno	Fresa topo $\phi$ 6	T04
8	[Hatching]	Chanfro traseiro externo	Broca de centro $\phi$ 6	T03
9	[Hatching]	Desbaste e acabamento de topo	Fresa topo $\phi$ 10	T02
10	[Hatching]	Chanfro frontal	Broca de centro $\phi$ 6	T03

UTFR

PROCESSOS FRESA ACOPLAMENTO  $\phi$  7

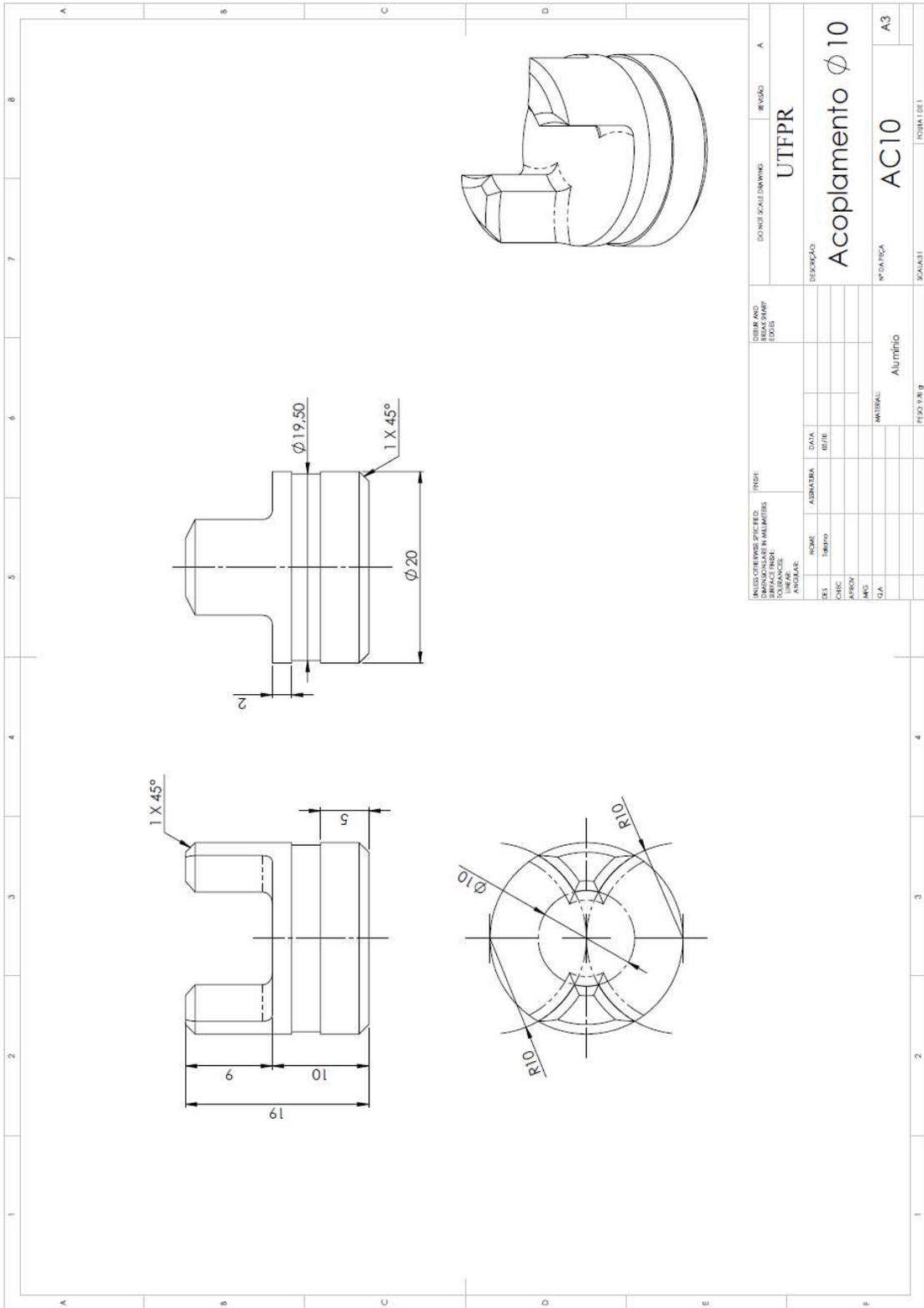
AC7

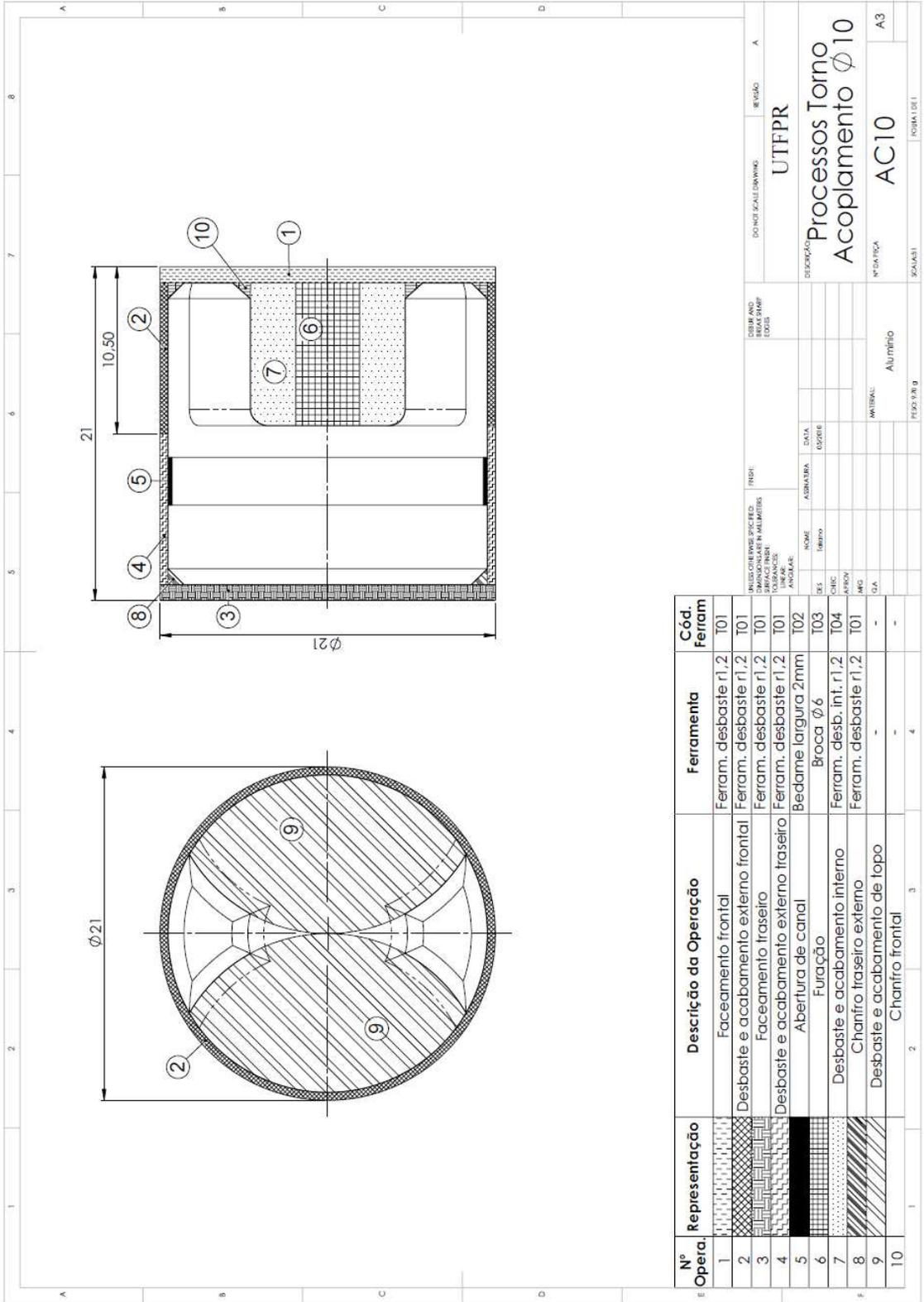
A3

Alumínio

FE03.326.9

FORMA 01.1





Nº Opera.	Representação	Descrição da Operação	Ferramenta	Cód. Ferram
1	[Hatched pattern]	Faceamento frontal	Ferram. desbaste r1,2	T01
2	[Hatched pattern]	Desbaste e acabamento externo frontal	Ferram. desbaste r1,2	T01
3	[Hatched pattern]	Faceamento traseiro	Ferram. desbaste r1,2	T01
4	[Hatched pattern]	Desbaste e acabamento externo traseiro	Ferram. desbaste r1,2	T01
5	[Hatched pattern]	Abertura de canal	Bedame largura 2mm	T02
6	[Hatched pattern]	Furação	Broca Ø6	T03
7	[Hatched pattern]	Desbaste e acabamento interno	Ferram. desb. int. r1,2	T04
8	[Hatched pattern]	Chanfro traseiro externo	Ferram. desbaste r1,2	T01
9	[Hatched pattern]	Desbaste e acabamento de topo	-	-
10	[Hatched pattern]	Chanfro frontal	-	-

UTFR

PROCESSOS TORNOS  
ACOPLEMENTO Ø10

DESCRIÇÃO: AC10

REF: 978 9

FECH: 978 9

REVISÃO: A

DESENHADOR: [ ]

PROJ: [ ]

ANEXO DE REVISÃO ESPECIFICADO EM MILÍMETROS: [ ]

SUPERFÍCIE FINISH: [ ]

UNIDADE: [ ]

ANGULO: [ ]

NOME: [ ]

DESCRIÇÃO: [ ]

DATA: [ ]

DESENHADOR: [ ]

CHECAR: [ ]

APROV: [ ]

AVD: [ ]

QA: [ ]

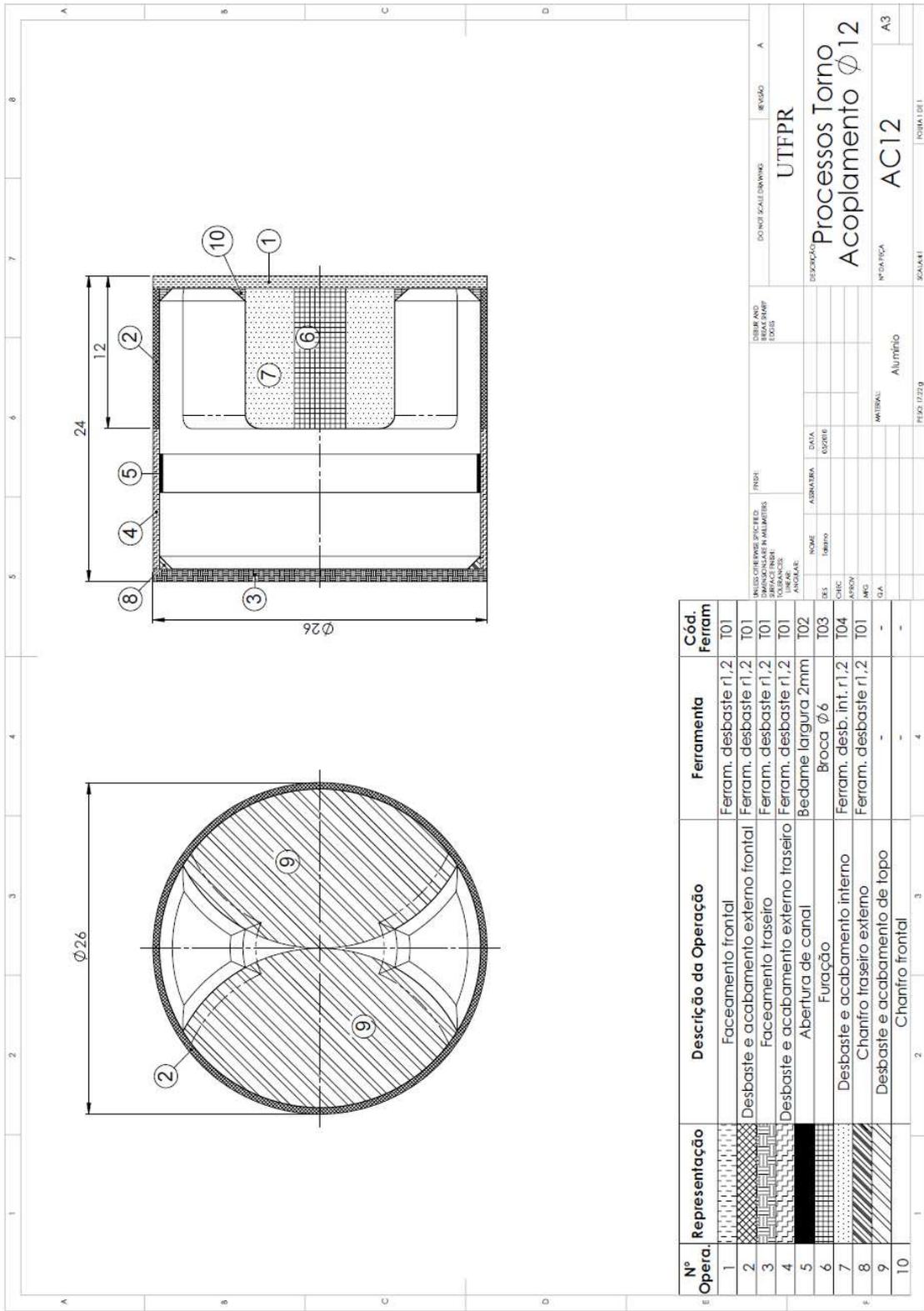
MATERIAL: Alumínio

ESCALA: 1:1

FOLHA 1 DE 1







Nº Opera.	Representação	Descrição da Operação	Ferramenta	Cód. Ferram
1	[Hatched pattern]	Facreamento frontal	Ferram. desbaste r1,2	T01
2	[Cross-hatched pattern]	Desbaste e acabamento externo frontal	Ferram. desbaste r1,2	T01
3	[Vertical line pattern]	Facreamento traseiro	Ferram. desbaste r1,2	T01
4	[Horizontal line pattern]	Desbaste e acabamento externo traseiro	Ferram. desbaste r1,2	T01
5	[Solid black pattern]	Abertura de canal	Bedame largura 2mm	T02
6	[Vertical line pattern]	Furação	Broca Ø 6	T03
7	[Dotted pattern]	Desbaste e acabamento interno	Ferram. desb. int. r1,2	T04
8	[Diagonal line pattern]	Chanfro traseiro externo	Ferram. desbaste r1,2	T01
9	[Diagonal line pattern]	Desbaste e acabamento de topo	-	-
10	[Diagonal line pattern]	Chanfro frontal	-	-

UTFR

PROCESSOS TORNOS  
ACOPLEMENTO Ø12

DESCRIÇÃO: **Processos Torno Acoplamento Ø12**

Nº DA PEÇA: **AC12**

MATERIAL: **Alumínio**

FECHO: 12/20

SCALE: 1:1

FORMA DE L.: **A3**

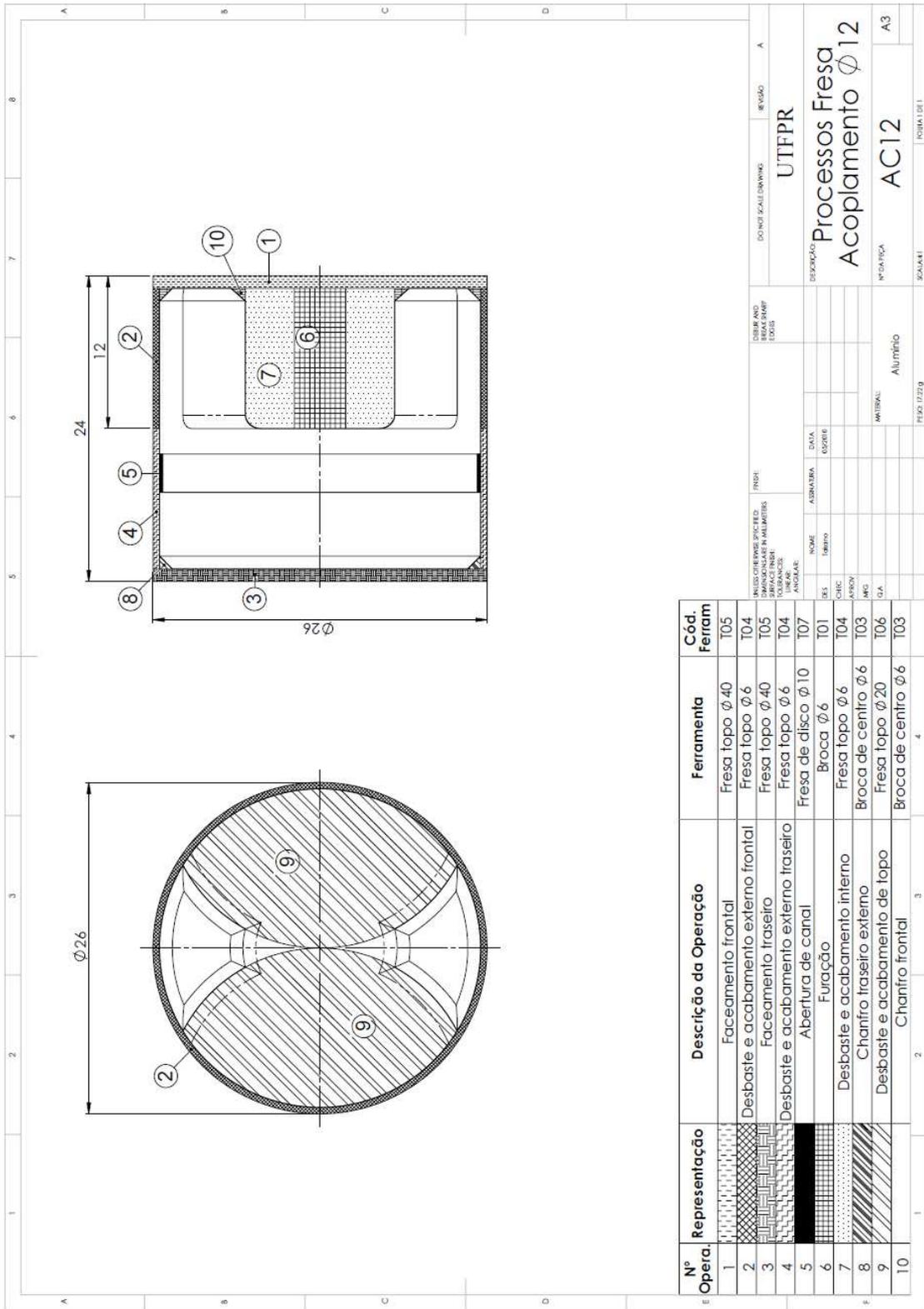
DO NOT SCALE DRAWING. REVISÃO: A

DESIGN AND CHECKED: [ ]  
EDUCATION: [ ]  
ELECTRIC: [ ]

FINISH: [ ]

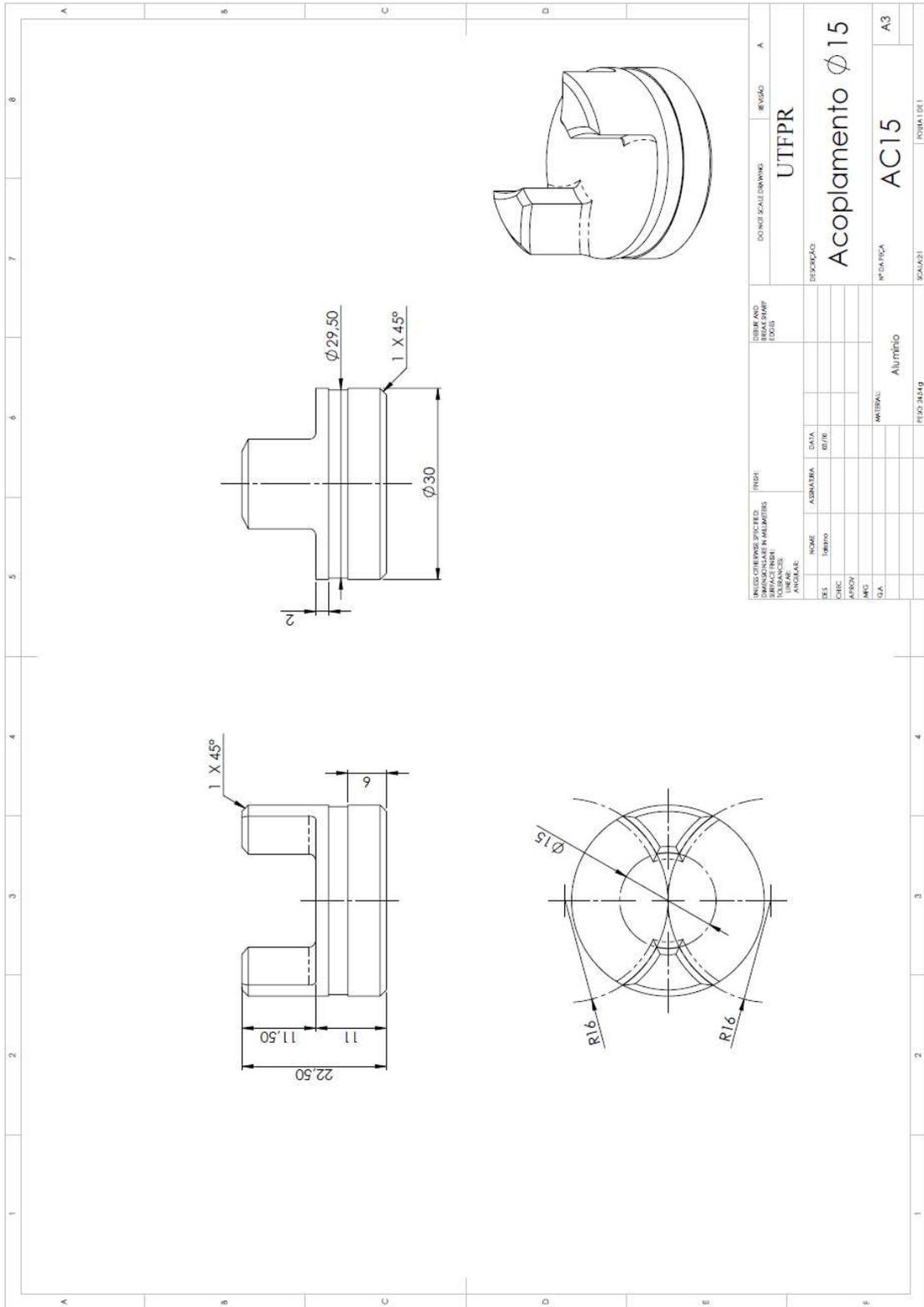
INDUSTRIAL SPECIFIED: [ ]  
SURFACE FINISH: [ ]  
TOLERANCE: [ ]  
ANGLE: [ ]

NAME: [ ]  
ITEM: [ ]  
DATE: [ ]  
DOPPEL: [ ]

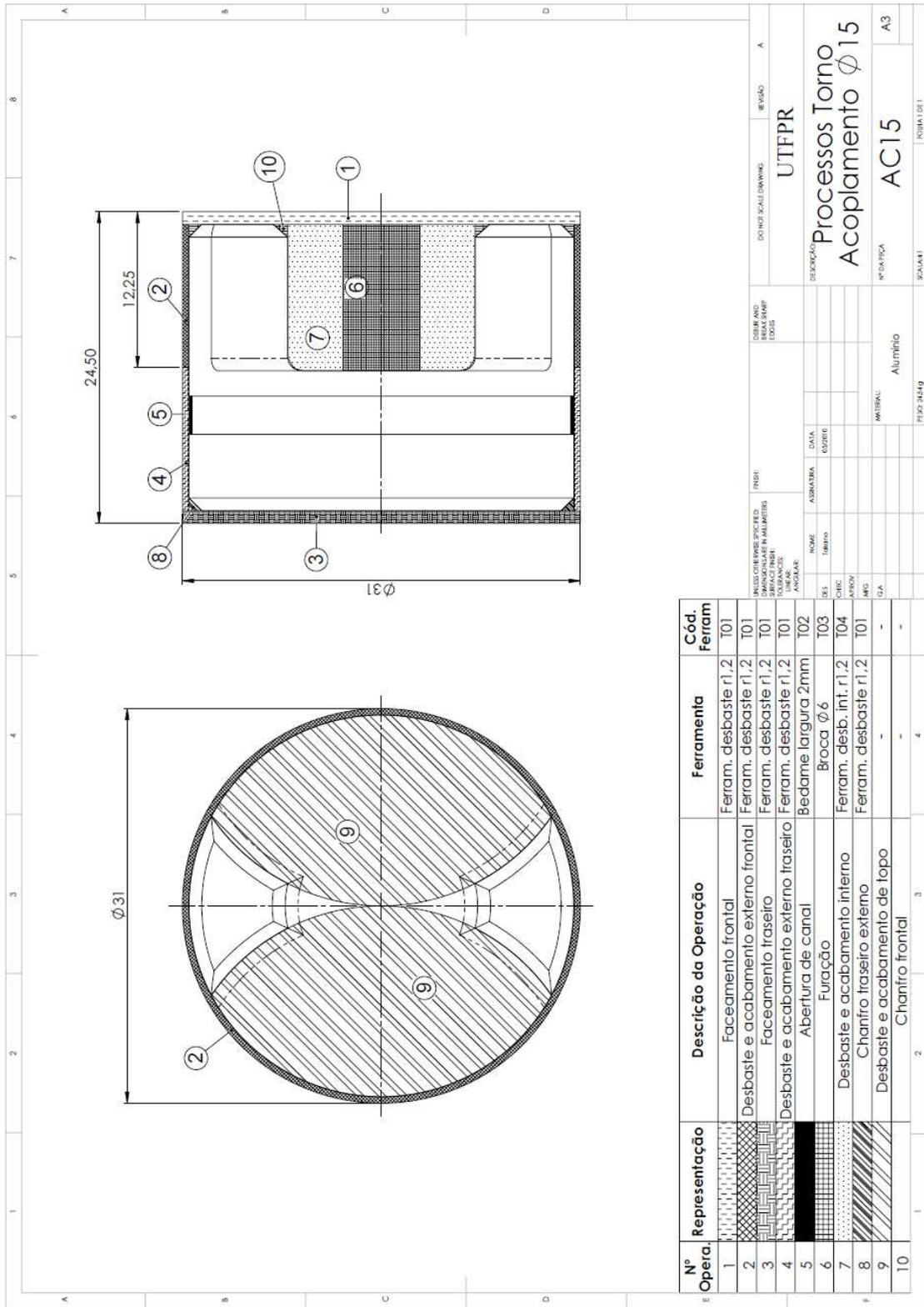


Nº Opera.	Representação	Descrição da Operação	Ferramenta	Cód. Ferram
1	[Hatched pattern]	Facreamento frontal	Fresa topo $\phi$ 40	T05
2	[Cross-hatched pattern]	Desbaste e acabamento externo frontal	Fresa topo $\phi$ 6	T04
3	[Vertical line pattern]	Facreamento traseiro	Fresa topo $\phi$ 40	T05
4	[Horizontal line pattern]	Desbaste e acabamento externo traseiro	Fresa topo $\phi$ 6	T04
5	[Solid black pattern]	Abertura de canal	Fresa de disco $\phi$ 10	T07
6	[Vertical line pattern]	Furação	Broca $\phi$ 6	T01
7	[Dotted pattern]	Desbaste e acabamento interno	Fresa topo $\phi$ 6	T04
8	[Diagonal line pattern]	Chanfro traseiro externo	Broca de centro $\phi$ 6	T03
9	[Diagonal line pattern]	Desbaste e acabamento de topo	Fresa topo $\phi$ 20	T06
10	[Diagonal line pattern]	Chanfro frontal	Broca de centro $\phi$ 6	T03

INDUS O BREVES SPECIES SURFACE FINISH TOLERANCE ANGLES	FRSH	DO NOT SCALE DRAWING	REVISOÃO	A
DESK AND DRAFT EDGES			UTFR	
DESCRIPTION	Processos Fresa Acoplamento $\phi$ 12			
MATERIAL	Alumínio	W.D.A.F.C.A.	AC12	A3
FIG. NO.	12210	SCALE		FORMA DE I.



UNITS OF DIMENSIONS SPECIFIED DIMENSIONS IN MILLIMETERS SURFACE FINISH TOLERANCES UNITS OF ANGLE: °		FINISH		DEBUR AND CHAMFER EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISOÃO	
ES	NO	AS	DA						
CHC	OM		IB						
AF									
MC									
UA									
MATERIAL: Alumínio				FECH 34.140		FORMA DELI		A3	
DESCRIÇÃO		ACoplamento Ø15		Nº DA PEÇA		AC15		FORMA DELI	



Nº Opera.	Representação	Descrição da Operação	Ferramenta	Cód. Ferram
1	[Hatched pattern]	Facreamento frontal	Ferram. desbaste r1,2	T01
2	[Hatched pattern]	Desbaste e acabamento externo frontal	Ferram. desbaste r1,2	T01
3	[Hatched pattern]	Facreamento traseiro	Ferram. desbaste r1,2	T01
4	[Hatched pattern]	Desbaste e acabamento externo traseiro	Ferram. desbaste r1,2	T01
5	[Hatched pattern]	Abertura de canal	Bedame largura 2mm	T02
6	[Hatched pattern]	Furação	Broca Ø 6	T03
7	[Dotted pattern]	Desbaste e acabamento interno	Ferram. desb. int. r1,2	T04
8	[Hatched pattern]	Chanfro traseiro externo	Ferram. desbaste r1,2	T01
9	[Hatched pattern]	Desbaste e acabamento de topo	-	-
10	[Hatched pattern]	Chanfro frontal	-	-

INDUSTRIAL: [ ]  
 DESAF: [ ]  
 PROJ: [ ]  
 DATA: [ ]  
 MATERIAL: Alumínio  
 PEÇO: 34.49  
 FOLHA: 01 DE 1

UTFR  
 Processos Torno  
 Acoplamento Ø15  
 AC15  
 A3



## APÊNDICE B – PARÂMETROS DE CORTE PARA A MINIMIZAÇÃO DOS TEMPOS DE USINAGEM NO TORNO E NA FRESADORA

Parâmetros de Corte no Torno CNC						
Operação	$v_{cd}$ [mm/min]	$a_{pd}$ [mm]	$f_d$ [mm/rev.]	$v_{ca}$ [mm/min]	$a_{pa}$ [mm]	$f_a$ [mm/rev.]
<i>i11</i>	50,00	0,90	0,728	94,00	0,10	0,214
<i>i12</i>	62,00	0,40	1,00	94,00	0,10	0,214
<i>i13</i>	50,00	0,90	0,728	94,00	0,10	0,214
<i>i14</i>	62,00	0,40	1,00	94,00	0,10	0,214
<i>i15</i>	62,00	0,15	1,00	94,00	0,10	0,214
<i>i16</i>	50,00	1,00	0,637	-	-	-
<i>i17</i>	62,00	0,40	1,00	94,00	0,10	0,214
<i>i18</i>	50,00	1,00	0,637	-	-	-
<i>i21</i>	50,00	0,90	0,728	94,00	0,10	0,214
<i>i22</i>	62,00	0,40	1,00	94,00	0,10	0,214
<i>i23</i>	50,00	0,90	0,728	94,00	0,10	0,214
<i>i24</i>	62,00	0,40	1,00	94,00	0,10	0,214
<i>i25</i>	62,00	0,15	1,00	94,00	0,10	0,214
<i>i26</i>	50,00	1,00	0,637	-	-	-
<i>i27</i>	50,00	0,95	0,68	94,00	0,10	0,214
<i>i28</i>	50,00	1,00	0,637	-	-	-
<i>i31</i>	50,00	0,90	0,728	94,00	0,10	0,214
<i>i32</i>	62,00	0,40	0,10	94,00	0,10	0,214
<i>i33</i>	50,00	0,90	0,728	94,00	0,10	0,214
<i>i34</i>	62,00	0,40	0,10	94,00	0,10	0,214
<i>i35</i>	62,00	0,15	1,00	94,00	0,10	0,214
<i>i36</i>	50,00	1,00	0,637	-	-	-
<i>i37</i>	50,00	0,725	0,957	94,00	0,10	0,214
<i>i38</i>	50,00	1,00	0,637	-	-	-
<i>i41</i>	50,00	0,90	0,728	94,00	0,10	0,214
<i>i42</i>	62,00	0,40	1,00	94,00	0,10	0,214
<i>i43</i>	50,00	0,90	0,728	94,00	0,10	0,214
<i>i44</i>	62,00	0,40	1,00	94,00	0,10	0,214
<i>i45</i>	62,00	0,15	1,00	94,00	0,10	0,214
<i>i46</i>	50,00	1,038	0,607	-	-	-
<i>i47</i>	50,00	0,78	0,872	94,00	0,10	0,214
<i>i48</i>	50,00	1,00	0,637	-	-	-

Parâmetros de Corte na Fresadora CNC								
Operação	$v_{cd}$ [mm/min]	$b_{pd}$ [mm]	$d_d$ [mm]	$f_{zd}$ [mm/rev.]	$v_{ca}$ [mm/min]	$b_{pa}$ [mm]	$d_a$ [mm]	$f_{za}$ [mm/ver.]
i11	50,00	1,00	-	0,62	-	-	-	-
i12	50,00	1,60	0,132	0,442	75,00	1,60	0,105	0,368
i13	50,00	1,00	-	0,62	-	-	-	-
i14	50,00	1,60	0,132	0,442	75,00	1,60	0,105	0,368
i15	50,00	2,00	0,139	0,335	75,00	2,00	0,111	0,279
i16	50,00	1,00	-	0,637	-	-	-	-
i17	50,00	1,00	0,133	0,697	80,00	1,00	0,10	0,581
i18	50,00	1,00	-	0,62	-	-	-	-
i19	50,00	1,75	0,121	0,439	75,00	1,75	0,10	0,354
i20	50,00	1,00	-	0,62	-	-	-	-
i21	50,00	1,00	-	0,62	-	-	-	-
i22	50,00	1,50	0,132	0,471	75,00	1,50	0,105	0,393
i23	50,00	1,00	-	0,62	-	-	-	-
i24	50,00	1,50	0,132	0,471	75,00	1,50	0,105	0,393
i25	50,00	2,00	0,139	0,335	75,00	2,00	0,111	0,279
i26	50,00	1,00	-	0,637	-	-	-	-
i27	50,00	1,80	0,127	0,408	76,00	1,80	0,10	0,340
i28	50,00	1,00	-	0,62	-	-	-	-
i29	50,00	3,00	0,121	0,257	75,00	3,00	0,10	0,207
i30	50,00	1,00	-	0,62	-	-	-	-
i31	50,00	1,00	-	0,62	-	-	-	-
i32	50,00	0,75	0,132	0,942	75,00	0,75	0,105	0,785
i33	50,00	1,00	-	0,62	-	-	-	-
i34	50,00	0,75	0,132	0,942	75,00	0,75	0,105	0,785
i35	50,00	2,00	0,139	0,335	75,00	2,00	0,111	0,278
i36	50,00	1,00	-	0,637	-	-	-	-
i37	50,00	2,75	0,121	0,28	75,00	2,75	0,10	0,225
i38	50,00	1,00	-	0,62	-	-	-	-
i39	50,00	0,786	0,12	0,985	75,00	0,786	0,10	0,789
i40	50,00	1,00	-	0,62	-	-	-	-
i41	50,00	1,00	-	0,62	-	-	-	-
i42	50,00	0,766	0,132	0,923	75,00	0,766	0,105	0,769
i43	50,00	1,00	-	0,62	-	-	-	-
i44	50,00	0,766	0,132	0,923	75,00	0,766	0,105	0,769
i45	50,00	2,00	0,139	0,335	75,00	2,00	0,111	0,279
i46	50,00	1,038	-	0,607	-	-	-	-
i47	50,00	1,15	0,122	0,662	75,00	1,15	0,10	0,539
i48	50,00	1,00	-	0,62	-	-	-	-
i49	50,00	1,437	0,159	0,407	95,00	1,437	0,10	0,339
i50	50,00	1,00	-	0,62	-	-	-	-

## APÊNDICE C – PARÂMETROS DE CORTE PARA A MINIMIZAÇÃO DOS CUSTOS DE FABRICAÇÃO NO TORNO

Posição na seqüência	Peça	Operação	$v_{cd}$ [mm/min]	$a_{pd}$ [mm]	$f_d$ [mm/rev.]	$v_{ca}$ [mm/min]	$a_{pa}$ [mm]	$f_a$ [mm/rev.]
k2	AC10	i21	50,00	0,90	0,728	80,00	0,10	0,21
		i22	62,00	0,40	1,00	75,00	0,10	0,201
		i23	50,00	0,90	0,728	80,00	0,10	0,21
		i24	62,00	0,40	1,00	75,00	0,10	0,201
		i25	50,00	0,15	1,00	75,00	0,10	0,201
k3	AC10	i21	50,00	0,90	0,728	80,00	0,10	0,21
		i22	62,00	0,40	1,00	75,00	0,10	0,201
		i23	50,00	0,90	0,728	80,00	0,10	0,21
		i24	62,00	0,40	1,00	75,00	0,10	0,201
		i25	50,00	0,15	1,00	75,00	0,10	0,201
		i26	50,00	1,00	0,637	-	-	-
		i27	50,00	0,633	1,00	75,00	0,10	0,201
i28	50,00	1,00	0,637	-	-	-		
k4 e k5	AC15	i41	50,00	0,90	0,728	75,00	0,10	0,201
		i42	50,00	0,40	1,00	75,00	0,10	0,201
		i43	50,00	0,90	0,728	75,00	0,10	0,201
		i44	50,00	0,40	1,00	75,00	0,10	0,201
		i45	50,00	0,15	1,00	75,00	0,10	0,201
		i46	50,00	1,038	0,607	-	-	-
		i47	50,00	0,78	0,872	75,00	0,10	0,201
i48	50,00	1,00	0,637	-	-	-		
k6 e k8	AC12	i31	50,00	0,90	0,728	75,00	0,10	0,201
		i32	50,00	0,40	1,00	75,00	0,10	0,201
		i33	50,00	0,90	0,728	75,00	0,10	0,201
		i34	50,00	0,40	1,00	75,00	0,10	0,201
		i35	50,00	0,15	1,00	75,00	0,10	0,201
		i36	50,00	1,00	0,637	-	-	-
		i37	50,00	0,725	0,957	75,00	0,10	0,201
i38	50,00	1,00	0,637	-	-	-		
k7	AC7	i11	50,00	0,90	0,728	75,00	0,10	0,201
		i12	50,00	0,40	1,00	75,00	0,10	0,201
		i13	50,00	0,90	0,728	75,00	0,10	0,201
		i14	50,00	0,40	1,00	75,00	0,10	0,201
		i15	50,00	0,15	1,00	75,00	0,10	0,201
		i16	50,00	1,00	0,637	-	-	-
		i17	50,00	0,40	1,00	75,00	0,10	0,201
i18	50,00	1,00	0,637	-	-	-		

## **APÊNDICE D - PRODUÇÃO CIENTÍFICA NO PERÍODO (Setembro 2008 – Agosto 2010)**

Durante o desenvolvimento do trabalho alguns artigos foram apresentados em congressos nacionais e internacionais. São eles:

RODRIGUES, Luiz C. A.; TAKANO, Mauricio I.; WIECHETECK, Rafael V. B. Analysis among three optimization techniques to set cutting parameters in turning operations. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 20., 2009, Gramado.

TAKANO, Mauricio I.; RODRIGUES, Luiz C. A.; WIECHETECK, Rafael V. B. Otimização da produção de uma célula flexível de manufatura envolvendo processo de torneamento. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 6., 2010, Campina Grande.

TAKANO, Mauricio I.; RODRIGUES, Luiz C. A. Seqüenciamento e balanceamento de uma célula flexível de manufatura usando programação linear inteira mista. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 42., 2010, Bento Gonçalves.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)