

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA

FERNANDO AUGUSTO REIS MIBACH
LEONARDO ANDRÉ MALACÁRIO CAMPOS

**BALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE USINAGEM NUMA
EMPRESA DE AUTOPEÇAS DE CURITIBA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2013

FERNANDO AUGUSTO REIS MIBACH
LEONARDO ANDRÉ MALACÁRIO CAMPOS

**BALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE USINAGEM NUMA
EMPRESA DE AUTOPEÇAS DE CURITIBA**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos de Abreu Rodrigues.

CURITIBA

2013

TERMO DE ENCAMINHAMENTO

Venho, por meio deste termo, encaminhar para apresentação a monografia do Projeto de Pesquisa “Balanceamento de uma linha de usinagem numa empresa de autopeças de Curitiba”, realizada pelos alunos Fernando Augusto Reis Mibach e Leonardo André Malacário Campos, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos de Abreu Rodrigues
UTFPR - Damec

Curitiba, 15 de Abril de 2013

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa “Balanceamento de uma linha de usinagem numa empresa de autopeças de Curitiba”, realizada pelos alunos Fernando Augusto Reis Mibach e Leonardo André Malacário Campos, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Luiz Carlos de Abreu Rodrigues
DAMEC, UTFPR
Orientador

Prof. Dr. Leandro Magatão
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Prof. Dr. Walter Luís Mikos
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 15 de Abril de 2013

RESUMO

CAMPOS, Leonardo A. M. (aluno); MIBACH, Fernando A. R. (aluno). Balanceamento de uma linha de usinagem numa empresa de autopeças de Curitiba. 2013. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Mecânica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Dada a agressividade atual da concorrência na indústria automobilística, a análise e a melhoria contínua dos processos de produção são indispensáveis para a sustentação e ampliação do lucro das empresas, seguindo os conceitos de otimização e manufatura enxuta. No presente trabalho é tratada a eliminação dos desperdícios relacionados à ociosidade, resultantes do desbalanceamento das operações ao longo de uma linha de produção de uma empresa de usinagem de Curitiba. Primeiramente, foram levantadas em campo as tarefas de usinagem necessárias para a produção da peça e seus respectivos tempos nas operações em que são realizadas atualmente. O método de estimativa de tempos de usinagem, atualmente em uso na empresa, foi testado e validado, quando necessário, através do ajuste de alguns parâmetros. Dessa forma, foram obtidos os tempos das mesmas tarefas em diferentes operações. Algumas dessas tarefas possuem a necessidade de ocorrer em determinada sequência, então um diagrama de precedências, englobando todas as tarefas, foi elaborado. Também foram analisadas em campo as restrições na alocação das tarefas decorrentes da fixação da peça na máquina, a qual possibilita apenas a usinagem de determinadas faces. Além disso, algumas tarefas são restringidas por condições especiais do processo. Dessa forma, nem todas as tarefas podem ser realizadas em todas as operações. Com os dados dos tempos das tarefas, das restrições decorrentes do diagrama de precedências, da fixação da peça na máquina e das condições especiais do processo, o balanceamento foi realizado através do equacionamento apresentado no trabalho. Foram alcançados resultados significativos, como uma redução de aproximadamente 10% do tempo de ciclo e um menor desbalanceamento entre as operações. Por fim, esses resultados foram discutidos e outras melhorias propostas.

Palavras-chave: balanceamento, manufatura enxuta, usinagem.

ABSTRACT

CAMPOS, Leonardo A. M. (aluno); MIBACH, Fernando A. R. (aluno). Balanceamento de uma linha de usinagem numa empresa de autopeças de Curitiba. 2013. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Mecânica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Given the current aggressive competition in the automobile industry, the analysis and the continuous improvement of production processes are essential to sustaining and expanding corporate profits, following the concepts of lean manufacturing and optimization. In this work, the elimination of wasted times related to idleness is discussed, which is the result of unbalance of operations along a production line of a machining company in Curitiba. First, the data were collected in the factory floor, associated to the machining tasks required to produce the parts and their respective processing times. The estimation method of machining times, currently in use at the company, was tested and validated, whenever necessary, some parameters were adjusted. Thereby, the machining times of the same tasks in different equipment were obtained. Some of these tasks need to occur in a specific sequence, then a precedence relations diagram, encompassing all tasks, was elaborated. The restrictions on the assignment of tasks were also analyzed. They can happen due to device characteristics which limit machining only to certain tasks. Moreover, some tasks are constrained by special conditions of the process. Thus, not all the tasks can be performed on all the machines. Balancing of tasks was accomplished using a mathematical model presented in this work. Finally, the results were analyzed quantitatively and qualitatively, in relation to productivity gains and also to possible reductions costs. Significant results were obtained, as a reduction of approximately 10% of the cycle time and a lower unbalancing between operations. Finally, these results were discussed and other improvements were proposed.

Keywords: line balancing, lean manufacturing, machining.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Disposição dos centros de usinagem.....	9
Figura 2 - Exemplo de fluxo unitário	12
Figura 3 - Exemplo de tempos de postos em uma linha produtiva	15
Figura 4 - Exemplo de diagrama de precedência.....	17
Figura 5 - Parâmetros de corte em uma operação de fresamento.....	19
Figura 6 - Parâmetros de corte em uma operação de fresamento.....	19
Figura 7 - Fluxograma da metodologia	23
Figura 8 - Localização das tarefas de 01 a 06 da OP10	25
Figura 9 - Localização das tarefas de 07 a 12 da OP10	25
Figura 10 - Dispositivo de fixação da OP10.....	26
Figura 11 - Localização das tarefas de 13 a 15 e 17 a 21 da OP15	27
Figura 12 - Localização da tarefa 16 da OP15	27
Figura 13 - Dispositivo de fixação da OP15.....	28
Figura 14 - Localização das tarefas de 22 a 27 e 31 da OP20	30
Figura 15 - Localização das tarefas 28 a 30 da OP20	30
Figura 16 - Dispositivo de fixação OP20.....	31
Figura 17 - Dispositivo de fixação OP20.....	31
Figura 18 - Localização das tarefas 32 a 36 da OP30	32
Figura 19 - Localização das tarefas 37 a 41 da OP30	33
Figura 20 - Dispositivo de fixação da OP30.....	33
Figura 21 - Resumo da linha.....	35
Figura 22 - Diagrama de precedência do processo.....	37
Figura 23 - Resumo resultante da linha.....	48
Figura 24 - Diagrama de precedência simplificado	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo de dados para o cálculo do tempo <i>takt</i>	14
Tabela 2 - Valores de $nm(w)$ e $np(w)$ X Máquina	22
Tabela 3 - Identificação das tarefas X Tempos na OP10	24
Tabela 4 - Identificação das tarefas X Tempos na OP15	26
Tabela 5 - Identificação das tarefas X Tempos na OP20	29
Tabela 6 - Identificação das tarefas X Tempos na OP30	32
Tabela 7 - Restrições das tarefas	38
Tabela 8 - Tarefas x Possibilidade de Usinagem nas Operações.....	40
Tabela 9 - Tempo real da tarefa x tempo estimado	42
Tabela 10 - Tempos de todas as tarefas em todas as operações possíveis	44
Tabela 11 - Alocação resultante das tarefas	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Contexto do Tema	8
1.2	Caracterização do Problema	8
1.3	Objetivos	10
1.4	Justificativa	10
2	Fundamentação Teórica	11
2.1	Manufatura Enxuta	11
2.1.1	Tempo <i>takt</i>	13
2.1.2	Tempo de ciclo	14
2.1.3	Balanceamento de Linha de Produção	15
2.1.4	Diagrama de precedência	16
2.2	Parâmetros de corte	17
2.3	Modelagem matemática	21
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	23
3.1	Identificação das operações e respectivos tempos atuais	23
3.1.1	Operação 10	24
3.1.2	Operação 15	26
3.1.3	Operação 20/30	29
3.2	Situação atual	34
3.2.1	Tempo <i>takt</i> atual	34
3.2.2	Comparação de tempos totais entre as operações	34
3.3	Identificação e descrição das restrições de cada tarefa	35
3.3.1	Diagrama de precedência	36
3.3.2	Restrições de fixação e condições especiais	38
3.3.3	Possibilidades de alocação das tarefas	39
3.4	Validação do método de estimativa de tempos	41
3.5	Estimativas dos tempos de todas as operações em todas as máquinas	43
3.6	Modelagem matemática	45
4	RESULTADOS	46
5	CONCLUSÕES	50
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do Tema

Atualmente, a indústria automobilística chegou a um nível de competitividade em que, para uma empresa concorrer em igualdade, ela precisa fornecer produtos com cada vez menor preço, maior qualidade, ciclo de vida no mercado cada vez mais curto devido a frequentes alterações de projeto, e só assim garantindo a satisfação de seus clientes. Para tanto, é indispensável ter o efetivo controle de todas as suas atividades produtivas, com o intuito de avaliar o desempenho de seus processos e intervir rapidamente realizando as melhorias possíveis. Nesse contexto, problemas recorrentes na indústria são o desbalanceamento e a inadequada alocação de carga nos postos de trabalho de linhas produtivas, causando perdas de produtividade, aumento de custos e, conseqüentemente, não gerando o máximo retorno financeiro possível. No campo de trabalho, tal problema dificilmente é analisado por completo, sendo que a solução fica a encargo do “bom senso” dos membros mais experientes na área disponíveis pela empresa.

Outra hipótese para a não ocorrência de balanceamento de linha de uma maneira exata na indústria é a falta de *softwares* disponíveis no mercado. Em uma pesquisa realizada por Becker e Scholl (2006), constatou-se a existência de somente dois *softwares* que apresentavam um algoritmo de otimização e uma interface amigável para gerenciamento de dados. E somente um deles apresentava recursos para análise de modelos mistos (mais de uma peça fabricada pela linha).

O presente projeto foi motivado pela compreensão, levando em consideração os conhecimentos adquiridos no curso de Engenharia Industrial Mecânica, na área de Manufatura, de um problema real de má distribuição de carga em cada posto de trabalho em uma linha de usinagem na empresa de estágio de um dos autores.

1.2 Caracterização do Problema

Em uma empresa de usinagem de autopeças de Curitiba, responsável pela produção de uma peça de alumínio, há a disponibilidade de quatro centros de usinagem, que não são capazes de suprir a demanda, ou seja, a linha possui tempo de ciclo superior ao tempo *takt*.

Na Figura 1, cada máquina contém dois *pallets*. Na máquina 1, cada *pallet* suporta duas peças para a operação 10. Essa máquina possui dois eixos árvores, sendo que o segundo reproduz exatamente os mesmos movimentos do primeiro, assim são usinadas as duas peças simultaneamente. Na máquina 2, cada *pallet* suporta apenas uma peça para a operação 15. Nas máquinas 3 e 4, o *pallet* 1 suporta duas peças para operação 20 e o *pallet* 2 suporta duas peças para operação 30. Diferentemente da máquina 1, as máquinas 3 e 4 possuem apenas um eixo árvore e a cada giro de *pallet* são usinadas duas peças não simultaneamente. Portanto, o tempo das operações 20 e 30 são os tempos necessários para a usinagem de duas peças. Para a completa usinagem de uma peça, ela deve passar obrigatoriamente pelas operações 10, 15, 20 e 30, nesta sequência. Dessa maneira, 100% das peças passam pelas duas primeiras máquinas e, a partir daí, o fluxo é dividido igualmente entre as máquinas 3 e 4.

Cada máquina usina apenas as peças de um *pallet* por vez, enquanto o outro está disponível para o operador efetuar a carga e descarga de peças. Dessa forma, as operações a serem balanceadas são automáticas e não há influência humana nos tempos de ciclo.

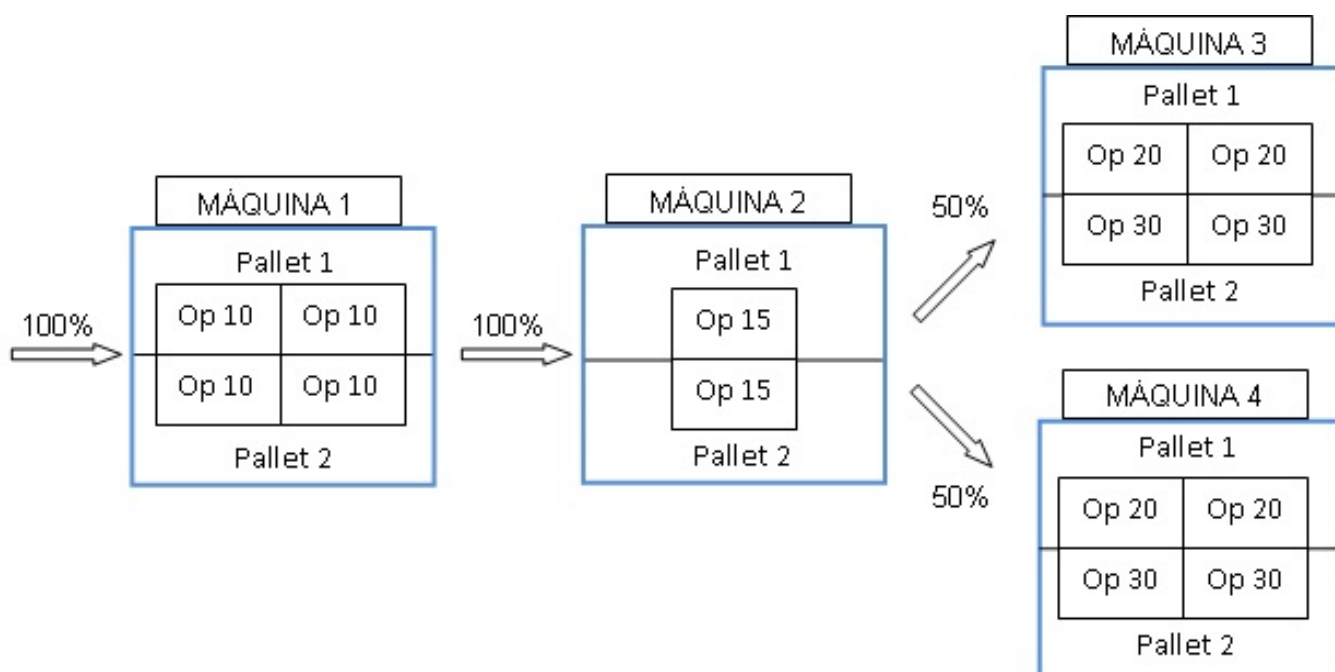


Figura 1 - Disposição dos centros de usinagem

Fonte: Autoria própria

Vale ressaltar que o quarto centro de usinagem foi recentemente adicionado com o intuito de aumentar a produtividade, momento em que a percepção do problema ou percepção da oportunidade de melhorias, como o correto balanceamento, ocorreu.

Um dos maiores problemas, em utilizar um método empírico (planilha de cálculo), é a não distribuição uniforme de carga em cada posto de trabalho, uma vez que dificilmente todas as combinações são exploradas. Essa má distribuição implica um gargalo de produção, ou seja, um limitador do tempo de produção.

1.3 Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho é a otimização do balanceamento da linha de usinagem de uma empresa de Curitiba-PR.

Os objetivos específicos são:

- Aplicar um modelo matemático para o método SALBP-2.
- Avaliar a possibilidade de redução do tempo de ciclo da linha.
- Avaliar uma melhor alocação das tarefas nas máquinas.

1.4 Justificativa

O problema de balanceamento de linhas produtivas faz parte do dia-a-dia das empresas de produção e pode ser responsável por grande perda de produtividade. Atualmente, na maioria dos casos, este problema não é solucionado da maneira adequada, tornando-se, assim, uma grande oportunidade de melhoria.

Ao realizar o balanceamento adequado de uma linha, o tempo de ciclo é reduzido, resultando em uma quantidade maior de peças produzidas ao final de cada intervalo de tempo.

Este trabalho engloba, principalmente, a área de manufatura e fabricação. Os conhecimentos na área de manufatura permitem a compreensão e solução dos problemas de produtividade, balanceamento e distribuição de carga. Já a área de fabricação possibilitará uma análise dos parâmetros de corte utilizados, a fim de obter uma estimativa do tempo necessário para cada tarefa em cada máquina.

A principal motivação é a solução de um problema real vivenciado por um estagiário da equipe na linha de usinagem, possibilitando que o presente trabalho seja uma alternativa de colaboração com a empresa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Manufatura Enxuta

Atualmente, a fim de aumentar a competitividade e lucratividade, muitas empresas tentam seguir os conceitos da Manufatura Enxuta (*Lean Manufacturing*) ou Sistema Toyota de Produção. O principal objetivo desse sistema de produção é distribuir da melhor forma possível todas as operações (em que uma operação é a menor tarefa que pode ser executada de maneira independente) necessárias para a transformação da matéria prima no produto final, tentando evitar, assim, a redução ou eliminação dos desperdícios. A lógica é produzir cada vez mais utilizando cada vez menos recursos e, simultaneamente, atender aos requisitos de qualidade necessários para a satisfação do cliente.

De acordo com Ohno (1997), melhorias devem ser realizadas a fim de identificar e reduzir os sete tipos de desperdício, que são:

1. Perdas por superprodução: é quando se produz mais do que o necessário ou antes do momento adequado. É um dos mais preocupantes tipos de desperdício, uma vez que pode mascarar os outros tipos de desperdício;
2. Perdas de tempo disponível (espera): consistem na ociosidade dos recursos, tanto máquinas e equipamentos como mão de obra, existentes entre as operações e são decorrentes do desbalanceamento entre elas;
3. Perdas em transporte: sendo o transporte uma operação que não agrega valor ao produto, deve ser reduzido ao mínimo possível;
4. Perdas do processamento: geralmente são etapas do processamento que podem ser eliminadas sem prejuízo para o produto. Limitações do equipamento ou métodos inadequados também se enquadram, como por exemplo parâmetros de corte mal dimensionados para um processo de usinagem;
5. Perdas por estoque: são as perdas associadas ao estoque de matéria prima, material entre as operações e produto final. Tais perdas têm a característica de esconder outros problemas;

6. Perdas por movimentação: consistem nas movimentações desnecessárias dos operadores e materiais na execução de uma tarefa;

7. Perdas por produção de produtos defeituosos: são as perdas resultantes da produção de produtos fora de determinada especificação ou padrão de qualidade determinado pelo cliente. Em alguns casos, as peças são refugadas e, em outros casos, operações de retrabalho são necessárias, ambos acarretando perdas.

A seguir, segue uma explicação sucinta das formas de se eliminar os desperdícios 3, 4, 5, 6 e 7, que não serão o foco do nosso trabalho.

Perdas em transporte podem ser reduzidas com alterações de *layouts*, reduzindo a distância entre as operações e, conseqüentemente, a movimentação total do material, desde matéria prima até o produto acabado.

Perdas no processamento são reduzidas eliminando operações desnecessárias ou alterando parâmetros, a fim de aumentar o desempenho do processo.

Perdas por estoque podem ser reduzidas implantando o fluxo unitário, ou seja, os tradicionais *layouts* por processo são convertidos em *layouts* por produto, sendo que a peça flui entre as operações sem estoques intermediários. Na Figura 2 segue um exemplo de fluxo unitário, onde os estoques intermediários são de apenas uma peça e os postos são arranjados conforme a necessidade do produto.

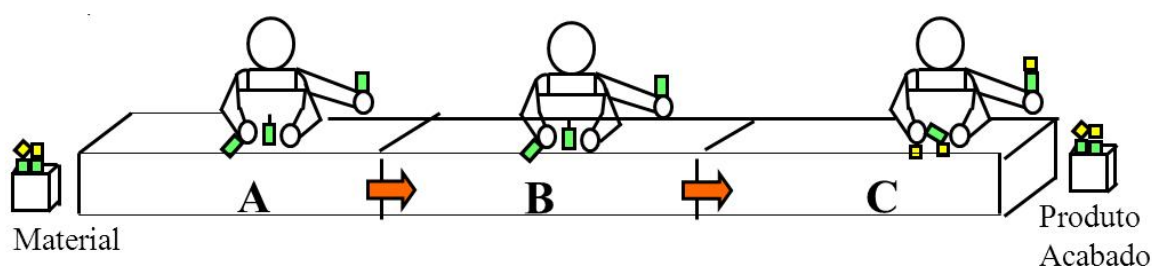


Figura 2 - Exemplo de fluxo unitário

Fonte: Adaptada de ALMEIDA e SOUZA (2000)

Perdas por movimentação podem ser reduzidas eliminando movimentações desnecessárias ou alterando as rotinas dos operadores, de modo que se possam realizar as mesmas tarefas caminhando menos ou com menor movimentação de materiais. Para realizar tais melhorias devem-se analisar os estudos de tempos e

movimentações, normalmente, resultando em uma redução de dez a vinte por cento nos tempos de operação. Também é possível automatizar algumas tarefas, embora essa opção seja recomendada apenas depois de esgotadas as melhorias nas rotinas e movimentações dos operadores (ALMEIDA e SOUZA, 2000).

Perdas por produção de produtos defeituosos são solucionadas através da aplicação sistemática de métodos de controle na fonte, ou seja, junto à causa-raiz do defeito (ALMEIDA e SOUZA, 2000).

Para um melhor entendimento de como reduzir os desperdícios decorrentes de perdas por superprodução e perdas em tempo disponível (espera) que serão o foco do nosso trabalho, alguns conceitos ainda precisam ser explicados:

2.1.1 Tempo *takt*

No Sistema de Manufatura Enxuta, o balanceamento das operações está fundamentalmente ligado ao conceito do tempo *takt*. O tempo *takt* é o tempo em que cada produto ou componente deve ser produzido de modo atingir a demanda do cliente, sem falta ou excesso. Dessa forma, o tempo *takt* associa e condiciona o ritmo de produção ao ritmo das vendas, seguindo o conceito de produção puxada pelo cliente (ALMEIDA e SOUZA, 2000).

Na lógica da “produção puxada” pelo cliente, o fornecedor produzirá somente quando houver demanda de seu cliente. Logo, o tempo *takt* é dado pela equação 1. A seguir será apresentado um exemplo de tempo *takt*.

$$\text{Tempo } takt = \frac{\text{Tempo total disponível/Período}}{\text{Demanda do Cliente/Período}} \quad (1)$$

Supondo uma demanda anual de 12.000 peças, 300 dias úteis do ano, um total de turnos por dia igual a 2, com 7 horas trabalhadas por turno e eficiência considerada igual a 90%, a Tabela 1 foi construída.

Tabela 1 - Exemplo de dados para o cálculo do tempo *takt*

Demanda anual (A)	12.000
Quantidade de dias úteis do ano (B)	300
Total de turnos por dia (C)	2
Total de horas trabalhadas por turno (D)	7
Eficiência (E)	90%
Tempo total disponível (horas/dia) (F)	12,6
Demanda diária (peças/dia) (G)	40
TEMPO TAKT (s/peça)	1134

Fonte: Autoria Própria

O tempo total disponível por dia, em horas, é dado por:

$$\text{Tempo total disponível por dia} = C * D * E = 2 * 7 * 0,9 = 12,6 \text{ horas/dia}$$

A demanda diária é dada por:

$$\text{Demanda diária} = \frac{A}{B} = \frac{12000}{300} = 40 \text{ peças/dia}$$

Logo, o tempo *takt* será:

$$\text{Tempo takt} = \frac{\text{Tempo total disponível/Período}}{\text{Demanda do Cliente/Período}} = \frac{12,6 \text{ horas/ dia}}{40 \text{ peças /dia}} = \frac{0,315 \text{ horas}}{\text{peça}}$$

ou

$$\text{Tempo takt} = \frac{1134 \text{ segundos}}{\text{peça}}$$

2.1.2 Tempo de ciclo

Um conceito muito importante para a compreensão do balanceamento das operações é o tempo de ciclo. Considerando o exemplo da Figura 3, uma linha com tempos de operações distintos em cada posto de trabalho ou máquina (A, B, C e D), supondo uma situação de linha cheia (em cada posto há uma peça já processada pela operação anterior esperando), é possível notar que apenas 3 minutos após o começo das operações (primeiro ciclo) é possível iniciar o processamento de uma nova peça em todas as máquinas (novo ciclo), sendo esse o tempo de ciclo da linha (ALVAREZ e ANTUNES JR., 2001).

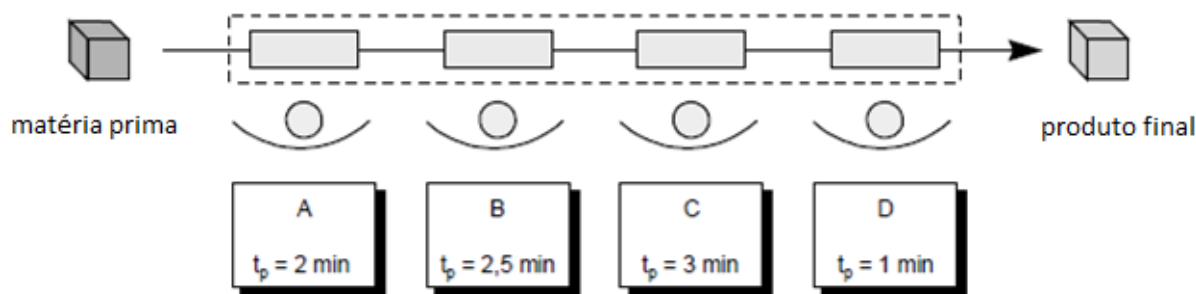


Figura 3 - Exemplo de tempos de postos em uma linha produtiva

Fonte: Alvarez e Antunes Jr. (2001)

O tempo de ciclo da linha ou célula é o tempo de execução da operação, ou das operações, na máquina/posto/operador mais lento; em outras palavras, é o ritmo real de produção, mantidas as condições atuais, e é definido pelas características dos equipamentos e peças e pela configuração da linha ou célula, como a alocação de trabalhadores aos postos de trabalho (ALVAREZ & ANTUNES JR., 2001). Efetivamente, a cada intervalo definido pelo tempo de ciclo, uma unidade é produzida.

Esse posto ou máquina mais lenta é chamado de gargalo de produção e é o principal responsável pela ociosidade. No exemplo acima, sendo o tempo total das operações de oito minutos e meio, o ideal seria que cada um dos quatro postos ou máquinas demorasse 2,125 ($8,5 \div 4$) minutos, reduzindo assim o tempo de ciclo da linha. Ou seja, a cada 2,125 minutos um produto final ficaria pronto, e não mais 3 minutos como anteriormente. Em um primeiro momento essa redução de tempo pode não parecer tão significativa, mas em uma análise do ponto de vista da alocação de recursos necessários para a transformação da matéria-prima em produto final, essa redução de tempo de ciclo pode representar até mesmo a extinção de um turno de trabalho na linha em questão.

2.1.3 Balanceamento de Linha de Produção

A definição clássica de balanceamento de linha, também denominado SALBP (Problema de balanceamento de linha de montagem simples) por Becker e Scholl (2006) é: dado um conjunto de operações com tempos diferentes, um conjunto de relações de precedência entre as operações e um conjunto de máquinas, o balanceamento será atribuir cada operação a exatamente uma máquina, desde que as relações de

precedência sejam respeitadas e a distribuição de carga entre as máquinas (ou postos de trabalho) seja a mais equilibrada possível, idealmente com tempos iguais em todas as máquinas. A característica pode ser dividida em duas variantes: ou um tempo de ciclo é dado e o número de máquinas deve ser minimizado, ou o número de máquinas é fixado e o tempo de ciclo deve ser otimizado. De acordo com Boysen et al. (2007), quando o objetivo é minimizar o tempo de ciclo com um número de máquinas fixo, o problema é denominado de SALBP-2. E quando o objetivo é minimizar o número de máquinas com um tempo fixo, o problema é denominado de SALBP-1.

Ao realizar o balanceamento da linha, o objetivo é atribuir tarefas aos postos de trabalho ao longo da linha de modo que a carga em todos os postos seja, aproximadamente, a mesma. Portanto, pode-se dizer que a produtividade desejada será alcançada quando aproximar-se o tempo de ciclo ao tempo takt em questão, produzindo no ritmo da demanda do cliente, evitando, assim, perdas por superprodução. Realizando o correto balanceamento, ou seja, distribuição das operações aos postos ou máquinas de forma que todos possuam, aproximadamente, a mesma quantidade de carga alocada, serão atenuados os gargalos de produção, evitando as perdas por ociosidade. Já as perdas por produção de produtos defeituosos, no presente trabalho, serão reduzidas distribuindo as características mais críticas às máquinas (centros de usinagem) de maior precisão.

2.1.4 Diagrama de precedência

O diagrama de precedência é uma técnica de representação visual que mostra as operações envolvidas em um processo de fabricação. O diagrama relaciona as dependências de uma ou mais operações em ordem cronológica. O tipo de dependência que será utilizado, que também é o mais comum, é o *finish-start*. Nesse tipo de dependência, uma atividade não pode ser iniciada enquanto a atividade imediatamente anterior não estiver finalizada. Para a confecção de um diagrama de precedência, desenham-se círculos representativos de cada operação e através de flechas, sempre de acordo com a sequência correta, são feitas as conexões das operações. Um exemplo de diagrama de precedência segue na Figura 4, em que nota-se a precedência da operação 01 e 02 em relação à operação 03. Ou seja, a operação 03 será realizada somente quando as operações 01 e 02 estiverem concluídas.

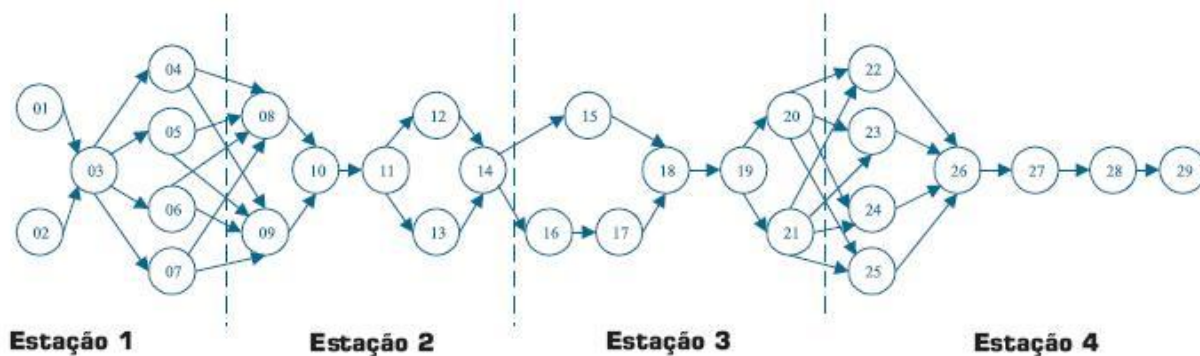


Figura 4 - Exemplo de diagrama de precedência

Fonte: Revista Produção v. 13 n. 3 (2003)

2.2 Parâmetros de corte

Nos processos de usinagem, existe uma série de importantes parâmetros de corte que descrevem quantitativamente os movimentos, as dimensões e outras características da operação de corte (CIMM, 2012).

Para estimar o tempo de usinagem de uma peça em uma determinada máquina, é necessário conhecer alguns parâmetros de corte de cada operação e alguns dados da máquina. Alguns dos parâmetros de corte são:

- **Velocidade de corte**

É a velocidade instantânea do ponto selecionado sobre o gume, no movimento de corte, em relação à peça. No fresamento, o movimento de corte é proporcionado pela rotação da ferramenta. A velocidade de corte é, então, uma velocidade tangencial. A unidade dimensional da velocidade de corte é metros/minuto (CIMM, 2012).

A equação 2 define a velocidade de corte em função do diâmetro D e da rotação n da ferramenta. O diâmetro é expresso em mm, a rotação em RPM e a velocidade de corte em m/min.

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

- **Número de dentes**

É o número de dentes, insertos ou facas que uma fresa possui.

- **Avanço**

O avanço por dente é a distância linear percorrida por um dente da ferramenta no intervalo em que dois dentes consecutivos entram em corte. A unidade dimensional é milímetro/dente.

O avanço por revolução é a distância linear percorrida por um conjunto de dentes que compõe uma ferramenta durante uma rotação completa dessa ferramenta. A unidade dimensional é milímetro/rotação (CIMM, 2012).

A equação 3 relaciona o avanço por dente (f_z), o avanço por revolução (f) e número de dentes (z).

$$f_z = \frac{f}{z} \quad (3)$$

- **Velocidade de avanço**

É a velocidade instantânea do ponto selecionado sobre o gume, no movimento de avanço, em relação à peça. A unidade dimensional é milímetro/minuto (CIMM, 2012).

Na Figura 5, V_C representa a velocidade de corte, V_f representa a velocidade de avanço e n representa o sentido de rotação da ferramenta. A equação 4 define a velocidade de avanço em função da rotação n , do número de dentes z e do avanço por dente f_z .

$$V_f = n * z * f_z \quad (4)$$

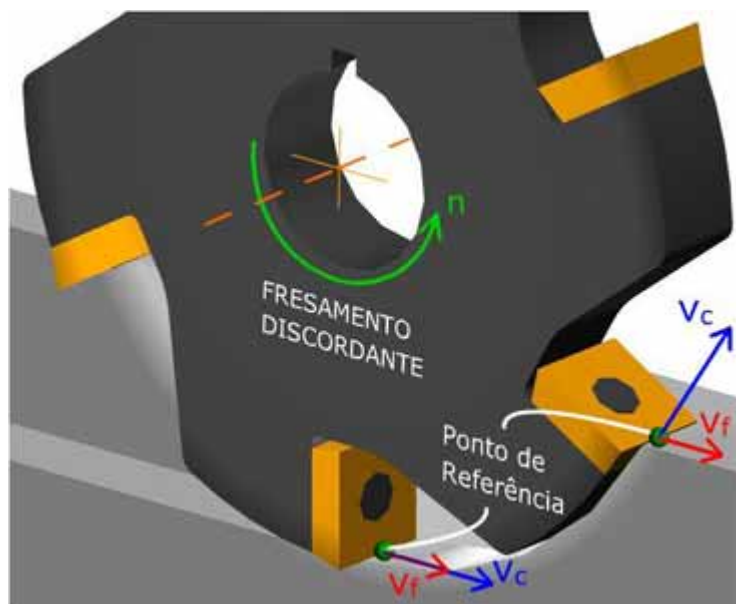


Figura 5 - Parâmetros de corte em uma operação de fresamento

Fonte: CIMM (2012)

- **Profundidade de corte**

É a quantidade que a ferramenta penetra na peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. A unidade dimensional é milímetro (CIMM, 2012). Na Figura 6, a_p representa a profundidade de corte.

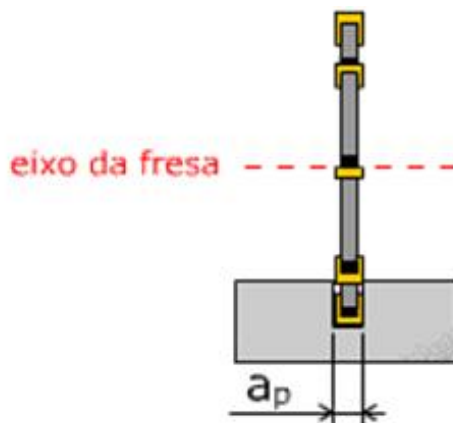


Figura 6 - Parâmetros de corte em uma operação de fresamento

Fonte: CIMM (2012)

- **Quantidade de passes**

É a quantidade de vezes que a ferramenta irá percorrer uma determinada trajetória.

- **Distância de aproximação**

A ferramenta se aproxima da peça a ser usinada com velocidade máxima até que ela fique a uma distância de aproximação mínima segura. Essa distância tem como função proteger a peça e a ferramenta de uma possível colisão caso haja alguma variação no processo.

- **Comprimento de usinagem**

É o comprimento a ser usinado na peça.

- **Comprimento total**

A soma do comprimento de usinagem com a distância de aproximação definirá o comprimento total, que é a distância que a ferramenta efetivamente percorre utilizando parâmetros de corte especificados.

- **Tempo efetivo**

É o tempo necessário para que a ferramenta efetue a usinagem do comprimento total. A equação 5 define o tempo efetivo de usinagem em função do comprimento total de usinagem L e da velocidade de avanço V_f .

$$t_e = \frac{L}{V_f} = \frac{L}{f * n} \quad (5)$$

- **Tempo de deslocamento**

É o tempo consumido pela ferramenta quando está em deslocamento em vazio. São todos os tempos secundários de usinagem, englobando a aproximação até a peça, posicionamentos e recuos em geral.

- **Tempo de troca de ferramenta**

É o tempo gasto para que haja a troca da ferramenta desde o porta-ferramentas do *magazine* até o eixo-árvore da máquina. No caso de diferentes tarefas, realizadas com a mesma ferramenta (ferramentas conjugadas), esse tempo será computado apenas uma vez, pois não é necessária uma nova troca de ferramenta.

- **Tempo de giro da mesa**

É o tempo necessário para que haja um giro de determinado ângulo na mesa, o qual é necessário para que seja possível a usinagem em outra face da peça.

2.3 Modelagem matemática

O modelo matemático para balanceamento de linhas, a ser apresentado neste trabalho, considera apenas um produto na linha e objetiva a minimização do tempo de ciclo (SALBP-2). Segundo a proposta de Battini et al. (2009), a expressão 6 tem como objetivo a minimização da diferença entre o tempo de ciclo e a soma dos tempos de todas as tarefas realizadas em cada máquina w . Na expressão 6, a variável binária $X(i,w)$ é igual a 1 se, e somente se, a tarefa i for realizado na máquina w . Cada tarefa tem um tempo definido t_i .

$$\text{(minimizar)} \quad \sum_{w=1}^W \left(c - \sum_{i=1}^I X(i,w) * t_i \right) \quad (6)$$

Para a expressão 6, Bock et al. (2006), Rajakumar et al. (2007) e Battini et al. (2009) definiram algumas restrições necessárias ao modelo proposto por Battini et al. (2009). As restrições são apresentadas nas equações a seguir.

$$\sum_{w=1}^W X(i,w) = 1 \quad \forall i = 1, \dots, I \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^I X(i,w) * t_i \leq c \quad \forall w = 1, \dots, W \quad (8)$$

$$\sum_{w=1}^W w * X(i,w) \leq \sum_{w=1}^W w * X(j,w) \quad \forall i = 1, \dots, I \text{ e } j = 1, \dots, J / i, j \in \text{prec}(i,j) \quad (9)$$

Para que uma tarefa seja executada exatamente uma vez na linha, a equação 7 é definida. Quando há processamento de apenas uma peça simultaneamente por operação, a inequação 8 restringe a soma dos tempos de todas as tarefas de uma

máquina. Essa soma deve ser menor ou igual ao tempo de ciclo da linha. A inequação 9 garante que as precedências serão cumpridas. As relações de precedência são identificadas por $prec(i,j)$, que representa o conjunto de tarefas i que deve preceder a tarefa j .

Especificamente para a linha de usinagem em questão, são necessárias algumas adequações nas restrições anteriores. Algumas tarefas devem ser usinadas na mesma máquina, por exemplo, quando há uma tolerância muito precisa de posição entre duas tarefas. Para contemplar essa restrição, a equação 10 foi implementada. As relações de restrição de mesma máquina são identificadas por $mmaq(i,j)$, que representa o conjunto de tarefas i que deve ocorrer na mesma operação da tarefa j . Além disso, conforme nota-se na Figura 1 da seção 1.2, existem diferentes números de máquinas e diferentes quantidades de peças usinadas por ciclo para cada operação. Dessa forma, precisam ser comparados os tempos das operações por peça, ou seja, esses tempos precisam ser divididos pelo produto da quantidade de máquinas de cada operação com a quantidade de peças usinadas por ciclo. A inequação 11 é um caso particular da inequação 8, presente no problema proposto, quando pode haver mais de uma máquina disponível para executar uma tarefa i e quando mais de uma peça pode ser usinada por vez numa máquina. Nesta restrição, $nm(w)$ e $np(w)$ indicam, respectivamente, o número de máquinas do tipo w disponíveis e o número de peças usinadas por vez na máquina w . Os valores de $nm(w)$ e $np(w)$ são apresentados na Tabela 2 a seguir. No problema proposto, a inequação 11 substituirá a inequação 8.

$$\sum_{w=1}^W w * X(i, w) = \sum_{w=1}^W w * X(j, w) \quad \forall i = 1, \dots, I \text{ e } j = 1, \dots, J / i, j \in mmaq(i, j) \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^I \frac{X(i, w) * t_i}{nm(w) * np(w)} \leq c \quad \forall w = 1, \dots, W \quad (11)$$

Tabela 2 - Valores de $nm(w)$ e $np(w)$ X Máquina

Máquina	$nm(w)$	$np(w)$
1	1	2
2	1	1
3/4	2	2

Fonte: Autoria Própria

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Primeiramente, foram identificadas todas as tarefas necessárias para a usinagem completa da peça, juntamente com seus respectivos tempos atuais. A seguir, através da análise do processo e do produto, foram levantadas as restrições ao balanceamento. Então, o método de estimativa de tempos de usinagem, em uso na empresa, foi ajustado e validado através da comparação entre a estimativa para as tarefas atuais e os tempos coletados. Depois, foi necessário estimar os tempos de todas as operações em todas as máquinas, uma vez que as mesmas tarefas demandam tempos diferentes em máquinas diferentes. Por fim, a modelagem matemática foi implementada e os resultados analisados. A Figura 7 a seguir resume as etapas deste trabalho.

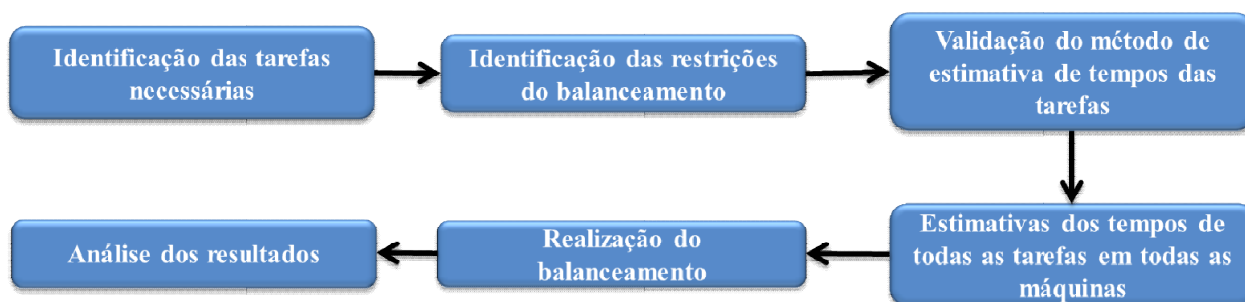


Figura 7 - Fluxograma da metodologia

Fonte: Autoria Própria

3.1 Identificação das operações e respectivos tempos atuais

As tarefas foram identificadas a partir da análise do produto e do processo (utilizando por vezes as folhas de processo), e seus respectivos tempos foram determinados como sendo a média aritmética de três cronometragens simples entre as trocas de ferramentas, as quais podem ser facilmente detectadas no painel da máquina CNC. Todos os giros de pallet são automáticos. Cada máquina usina apenas as peças de um *pallet* por vez, enquanto o outro está disponível para o operador efetuar a carga e descarga de peças. Dessa forma, as operações a serem balanceadas são automáticas e não há influência humana nos tempos de ciclo.

3.1.1 Operação 10

No processo atual, a operação 10 é executada na primeira máquina da linha, com capacidade de usinagem de duas peças simultaneamente. Essa operação compreende as tarefas da Tabela 3. As localizações das tarefas da operação 10 são apresentadas na Figura 8 e Figura 9. Nestas figuras, cada cor foi associada a uma tarefa distinta apresentada na Tabela 3. O dispositivo de fixação da operação 10, conforme a Figura 10, possibilita acesso às faces superior, traseira e inferior através do giro de mesa (quarto eixo).

Tabela 3 - Identificação das tarefas X Tempos na OP10

Tarefa	Descrição	Tempo (s)	
01	Fresamento Face Inferior	53,2	Azul escuro
02	Desbaste dos index de posição	19,3	Amarelo escuro
03	Acabamento dos index de posição	11,7	Amarelo escuro
04	Fresamento Assento	13,5	Vermelho escuro
05	Furação A	29,4	Vermelho claro
06	Desbaste B	39,2	Amarelo
07	Furação para Roscas C	16,1	Azul claro
08	Furação para Roscas D e E	26,7	Verde escuro
09	Rosqueamento D	26,0	Verde escuro
10	Rosqueamento E	6,9	Verde claro
11	Rosqueamento C	15,0	Azul claro
12	Furação Inclinação F	18,0	Rosa
Giro de <i>pallet</i>		6,0	
Total		281,0	

Fonte: Autoria Própria

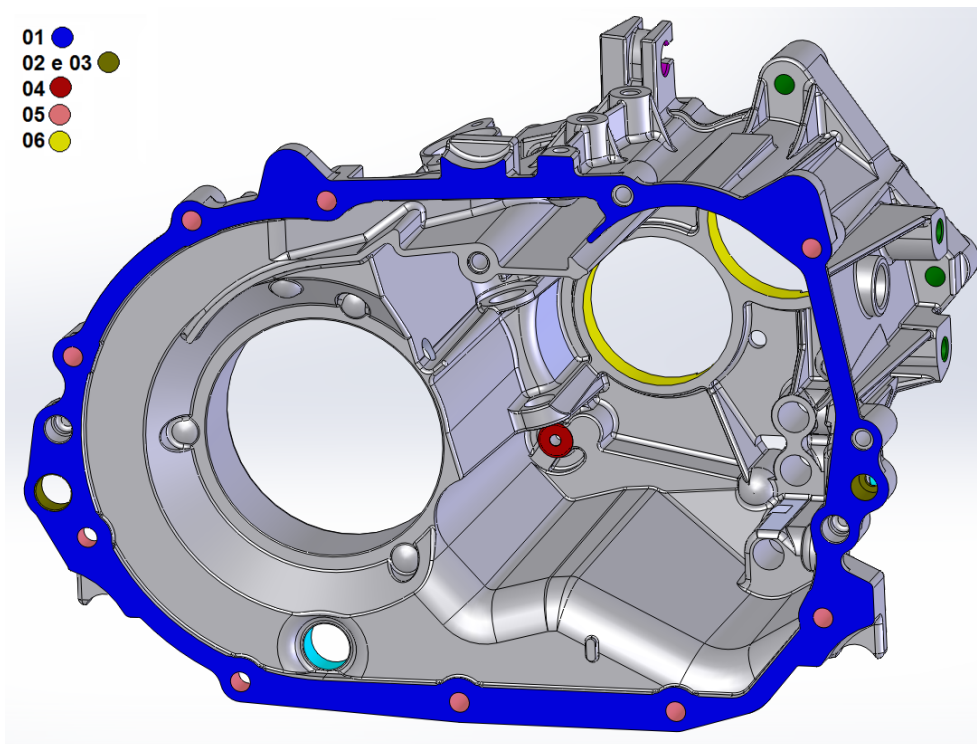


Figura 8 - Localização das tarefas de 01 a 06 da OP10

Fonte: Ilustração de Autoria Própria

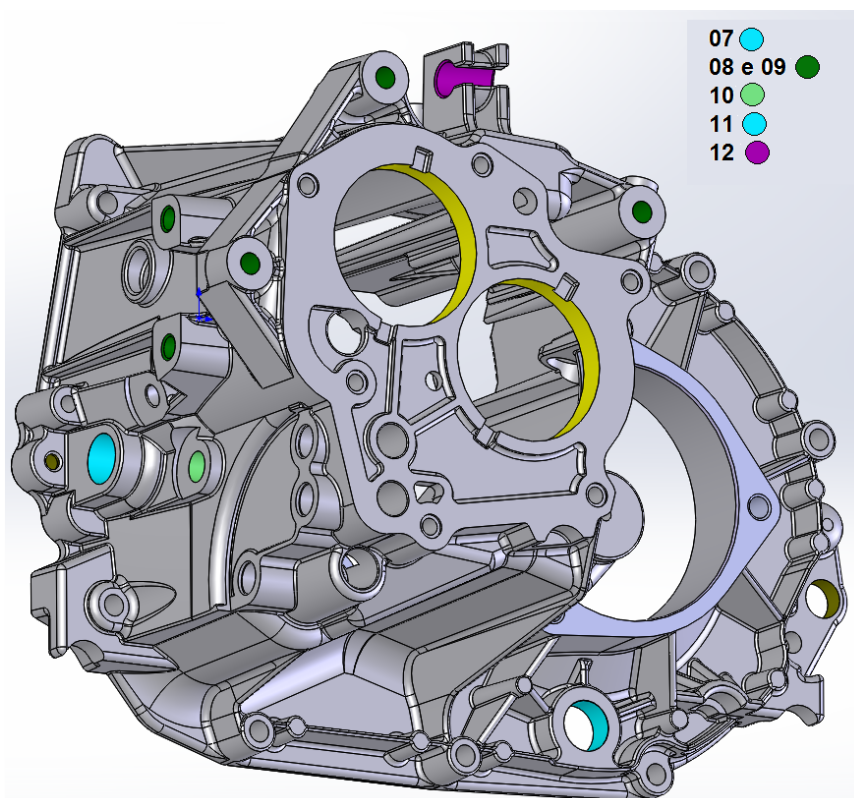


Figura 9 - Localização das tarefas de 07 a 12 da OP10

Fonte: Ilustração de Autoria Própria

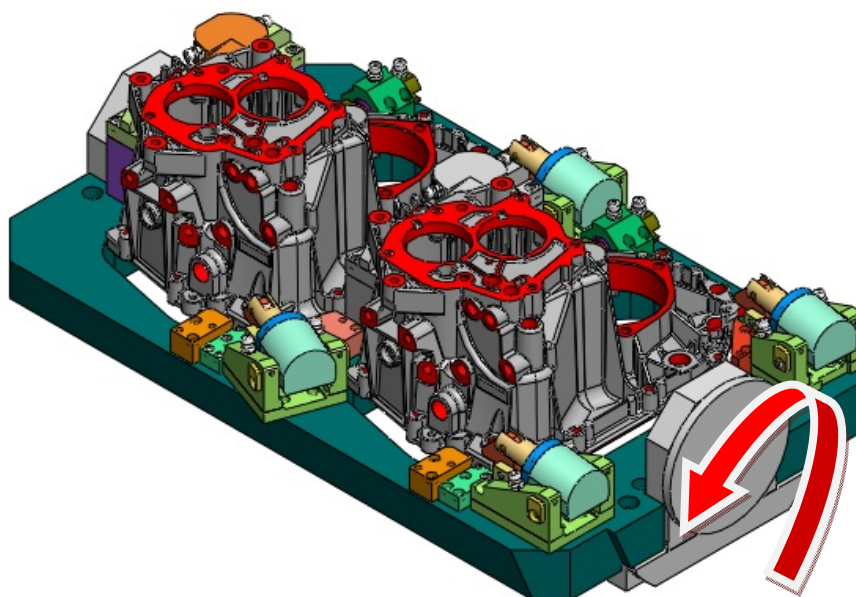


Figura 10 - Dispositivo de fixação da OP10

Fonte: Ilustração de Autoria Própria

3.1.2 Operação 15

A operação 15 é executada na segunda máquina da linha, usinando-se apenas uma peça por vez. Essa operação compreende as tarefas da Tabela 4. As localizações das tarefas da OP15 são apresentadas na Figura 11 e Figura 12. Nestas figuras, cada cor foi associada a uma tarefa distinta apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Identificação das tarefas X Tempos na OP15

Tarefa	Descrição	Tempo (s)	Cor
13	Furação G	4,1	Vermelho
14	Fresado de alívio	10,0	Laranja
15	Furo piloto para Roscas H	17,8	Amarelo
16	Fresamento do Canal	6,2	Verde
17	Furação para Roscas H	24,7	Amarelo
18	Furação para Roscas I	6,1	Rosa
19	Chanfros para Roscas H	5,0	Rosa e Amarelo
20	Rosqueamento H	29,2	Amarelo
21	Rosqueamento I	10,1	Rosa
Giro de <i>pallet</i>		3,4	
Total		116,6	

Fonte: Autoria Própria

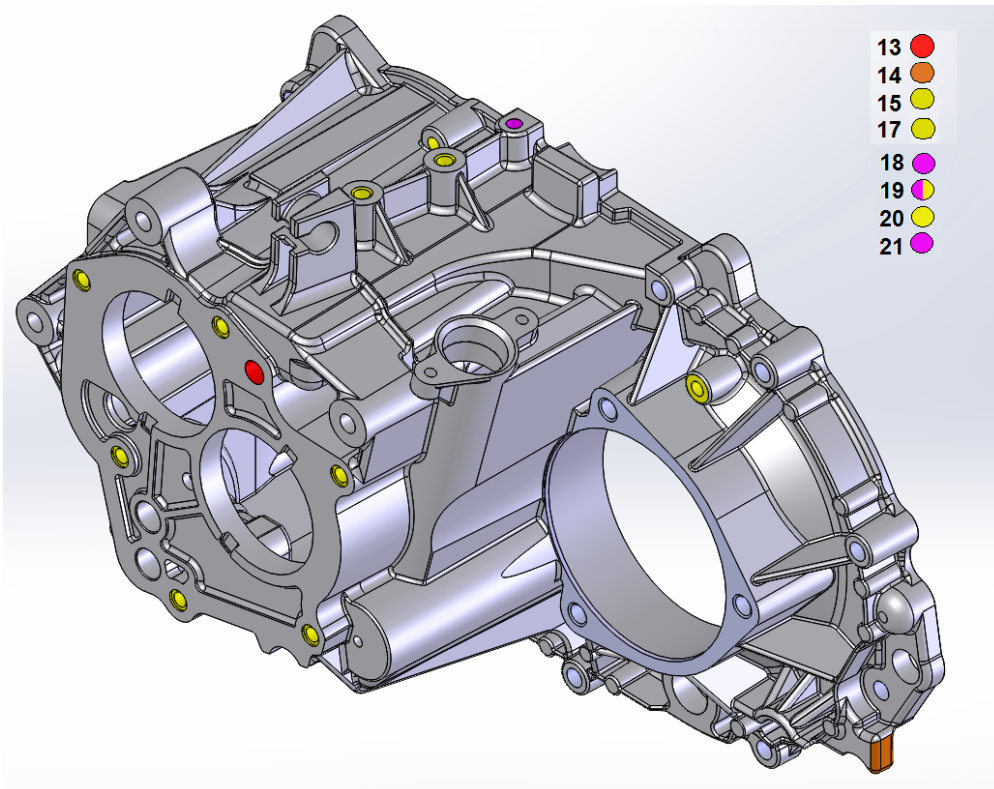


Figura 11 - Localização das tarefas de 13 a 15 e 17 a 21 da OP15

Fonte: Ilustração de Autoria Própria

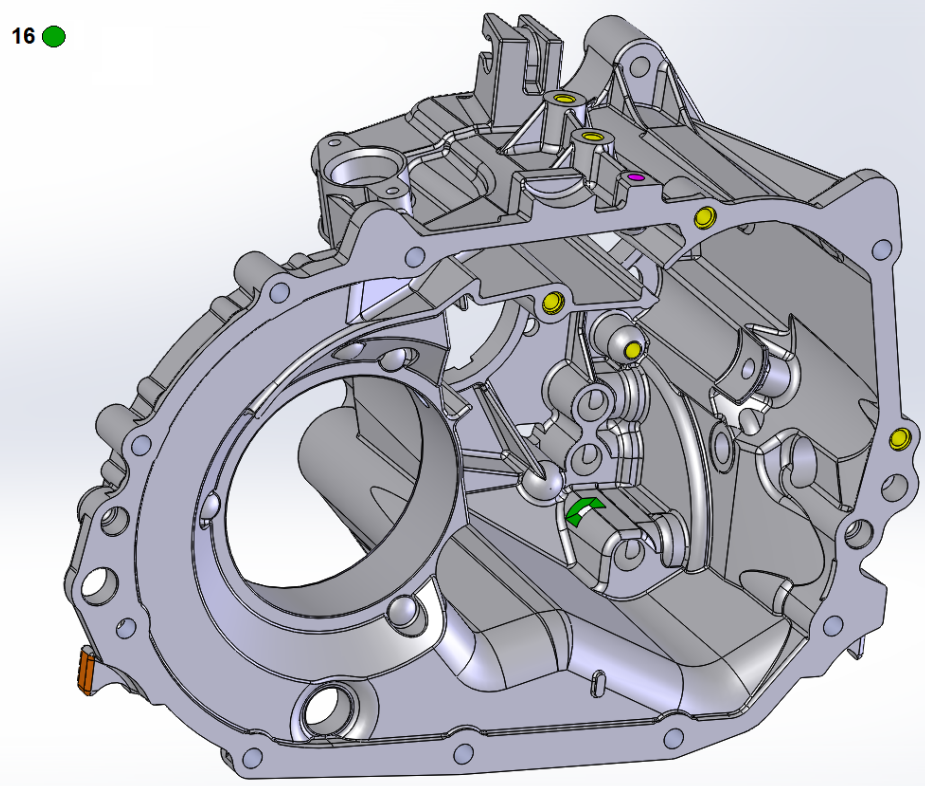


Figura 12 - Localização da tarefa 16 da OP15

Fonte: Ilustração de Autoria Própria

O dispositivo de fixação da operação 15, conforme a Figura 13, possibilita acesso as faces superior, laterais e inferior através do giro de mesa (quarto eixo).

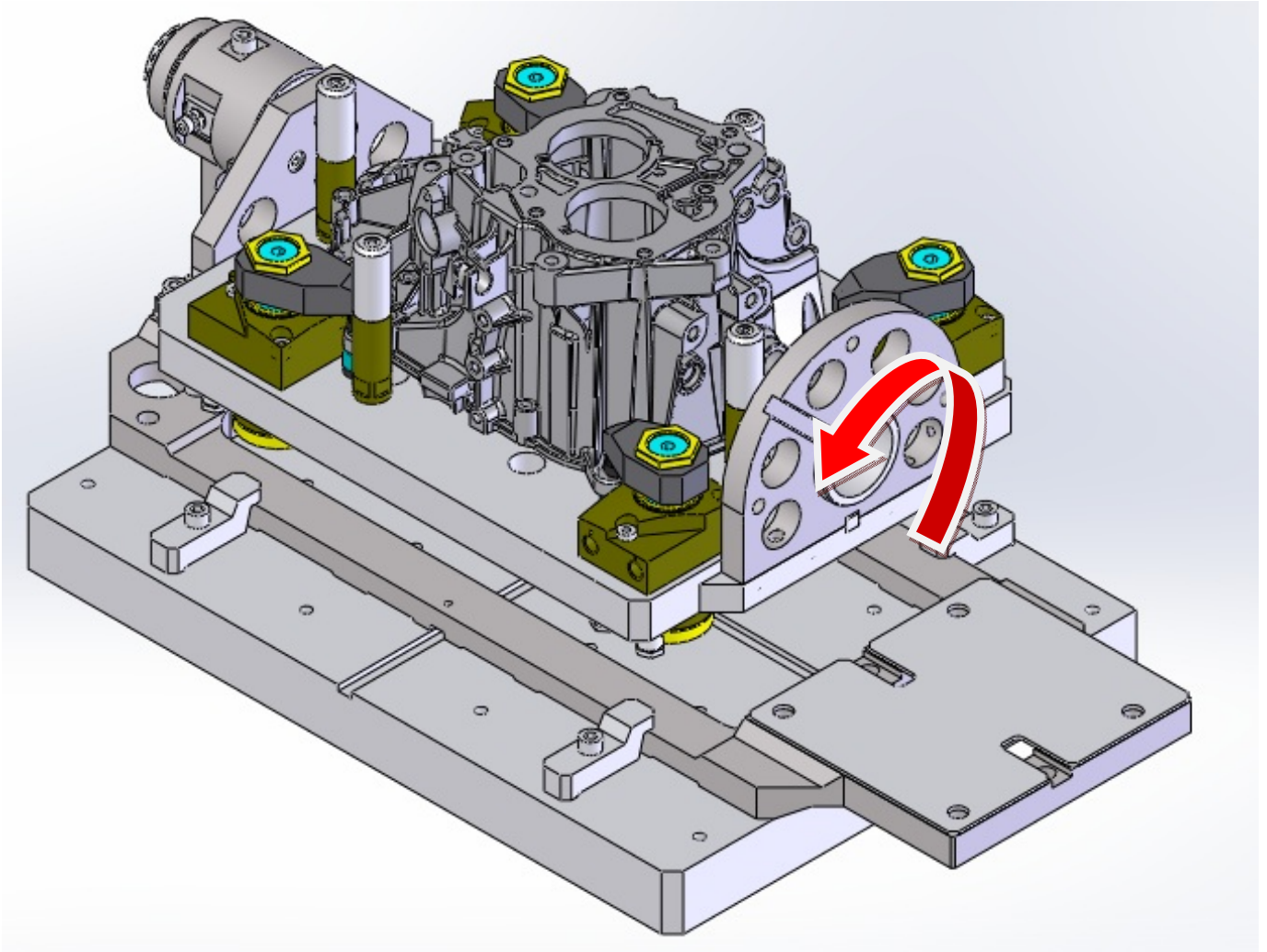


Figura 13 - Dispositivo de fixação da OP15

Fonte: Ilustração de Autoria Própria

3.1.3 Operação 20/30

A operação 20 é executada no *pallet* 01 nas duas últimas máquinas da linha, usinando-se duas peças por fixação, porém, não simultaneamente. Essa operação compreende as tarefas da Tabela 5. As localizações das tarefas da OP20 são apresentadas na Figura 14 e Figura 15. Nestas figuras, cada cor foi associada a uma tarefa distinta apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 - Identificação das tarefas X Tempos na OP20

Tarefa	Descrição	Tempo (s)	Cor
22	Usinagem Faces J e K	26,3	Vermelho
23	Furação L	15,0	Amarelo
24	Desbaste M + Furação para Roscas N	54,1	Verde claro
25	Rosqueamento N	11,8	Azul claro
26	Acabamento M	34,3	Verde claro/ Verde escuro
27	Acabamento O	42,9	Azul escuro
28	Desbaste dos index de posição 2	17,0	Rosa
29	Acabamento dos index de posição 2	16,9	Rosa
30	Desbaste e Acabamento P	22,8	Vermelho claro
31	Furação Inclinação Q	24,9	Roxo
Giro de <i>pallet</i>		6,0	
Total		272,0	

Fonte: Autoria Própria

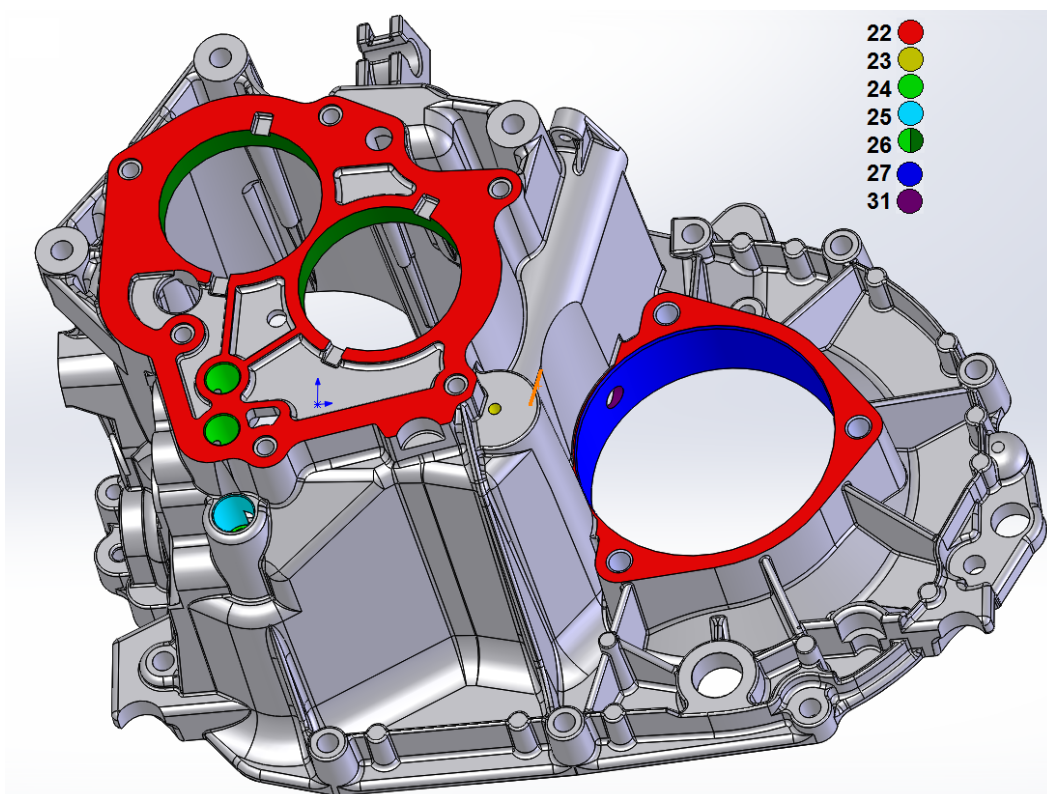


Figura 14 - Localização das tarefas de 22 a 27 e 31 da OP20

Fonte: Ilustração de Autoria Própria

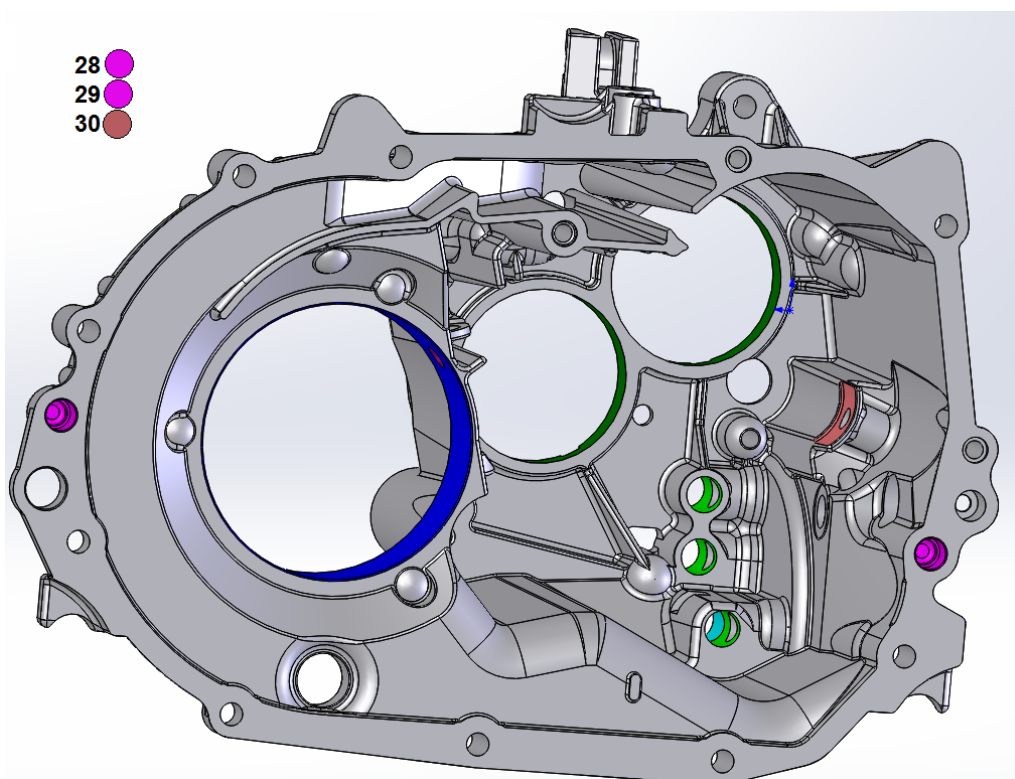


Figura 15 - Localização das tarefas 28 a 30 da OP20

Fonte: Ilustração de Autoria Própria

O dispositivo de fixação da operação 20, conforme a Figura 16 e Figura 17, possibilita, através do giro de mesa (quarto eixo), acesso total à face superior e acesso parcial à face inferior.

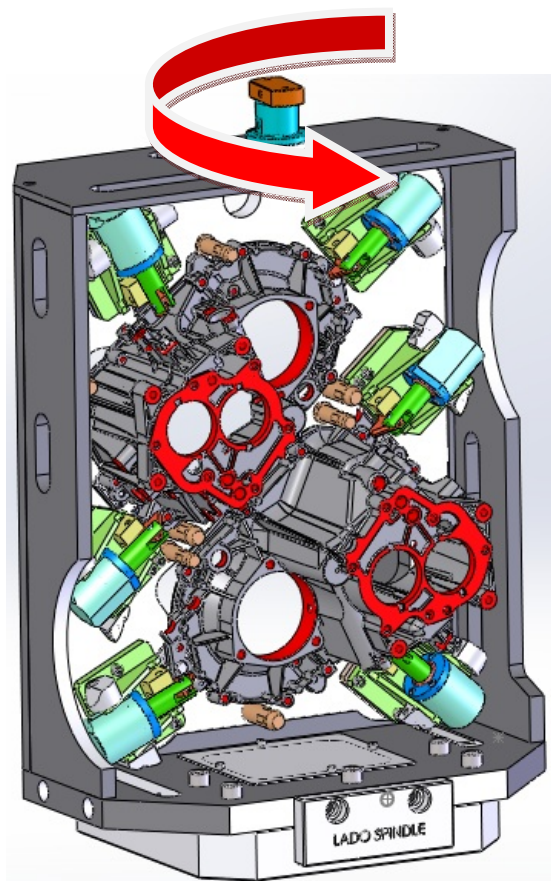


Figura 16 - Dispositivo de fixação OP20

Fonte: Ilustração de Autoria Própria

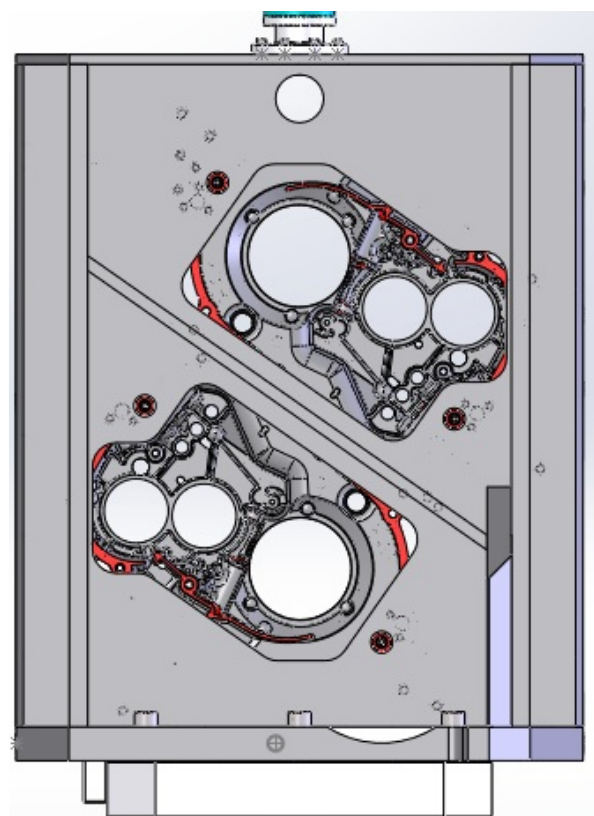


Figura 17 - Dispositivo de fixação OP20

Fonte: Ilustração de Autoria Própria

A operação 30 é executada no *pallet* 02 nas duas últimas máquinas da linha, usinando-se duas peças por fixação, porém não simultaneamente. Essa operação compreende as tarefas da Tabela 6. As localizações das tarefas da OP30 são apresentadas na Figura 18 e Figura 19. O dispositivo de fixação da operação 30, conforme a Figura 20, possibilita acesso as faces laterais e traseira através do giro de mesa (quarto eixo).

Tabela 6 - Identificação das tarefas X Tempos na OP30

Tarefa	Descrição	Tempo (s)	Cor
32	Fresamento Faces Laterais	32,7	Vermelho
33	Furação R	8,8	Amarelo
34	Desbaste S + Furação T	27,0	Verde
35	Rosqueamento T	19,8	Verde
36	Acabamento S	17,0	Verde
37	Furação U	12,9	Rosa
38	Rosqueamento U	15,4	Rosa
39	Desbaste V + Chanfro	20,2	Azul
40	Pré Acabamento V + M	33,0	Azul
41	Acabamento V + M	26,2	Azul
Giro de <i>pallet</i>		6,0	
Total		219,0	

Fonte: Autoria Própria

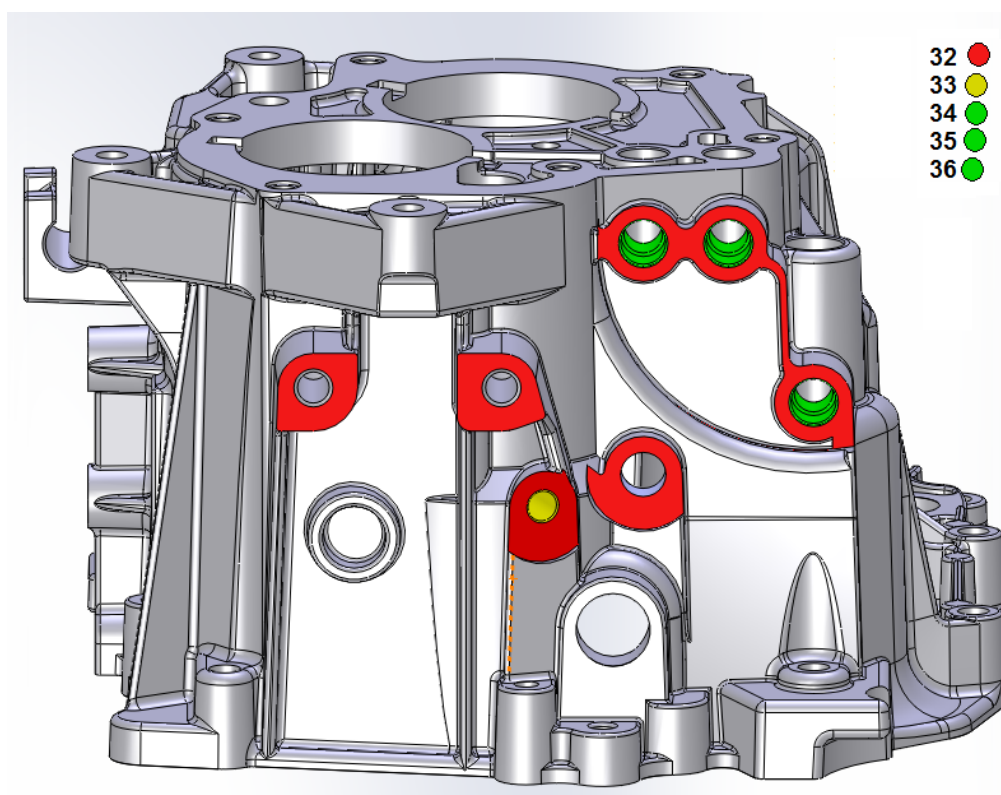


Figura 18 - Localização das tarefas 32 a 36 da OP30

Fonte: Ilustração de Autoria Própria

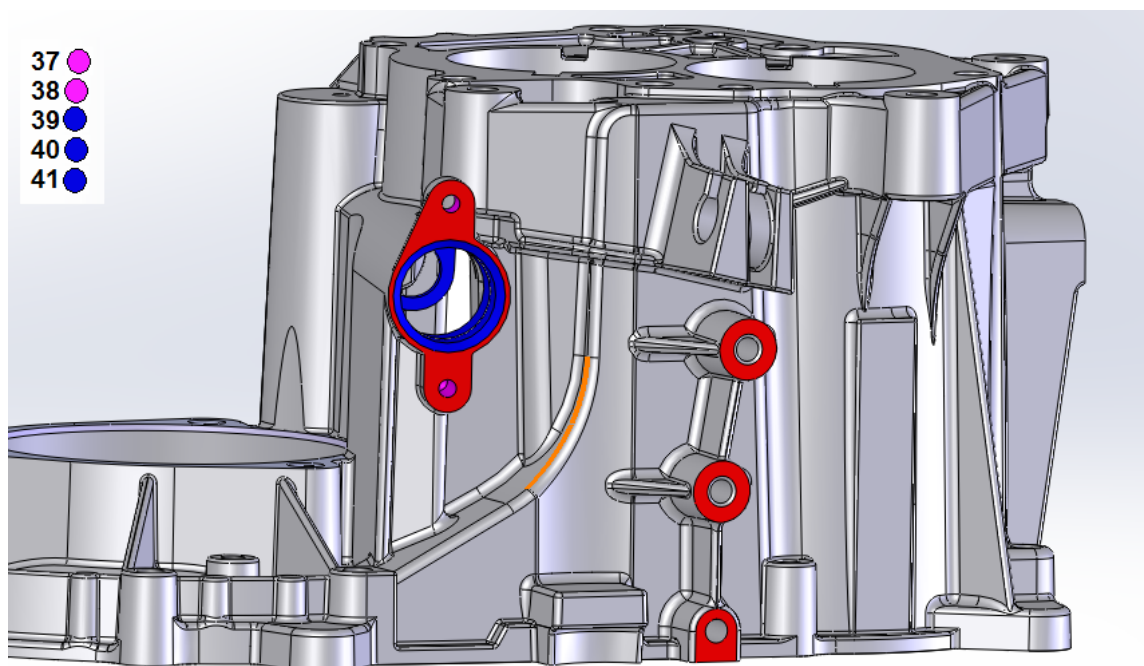


Figura 19 - Localização das tarefas 37 a 41 da OP30

Fonte: Ilustração de Autoria Própria

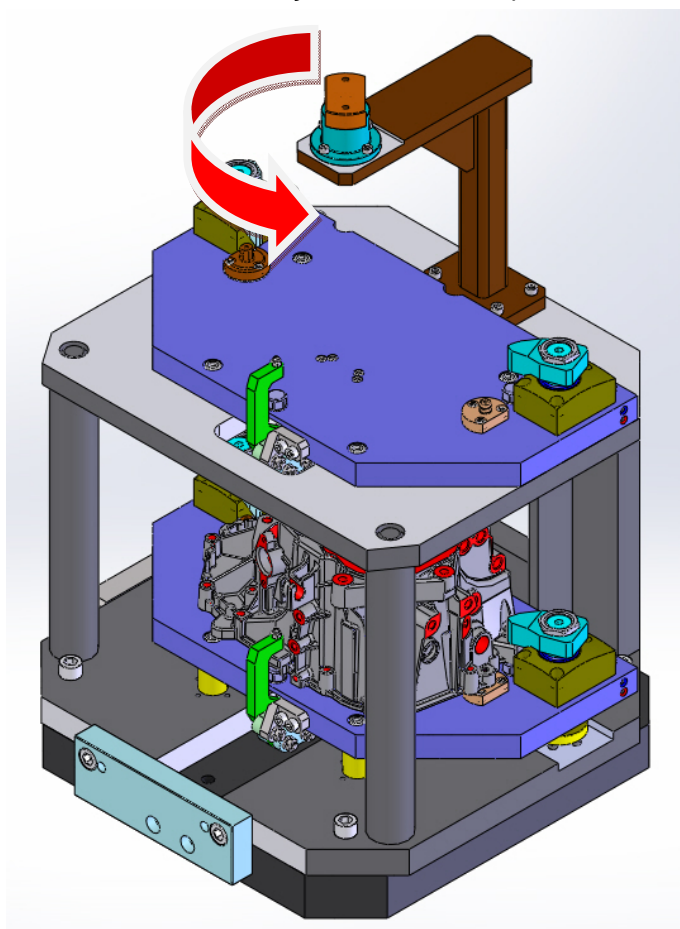


Figura 20 - Dispositivo de fixação da OP30

Fonte: Ilustração de Autoria Própria

3.2 Situação atual

Nessa seção serão apresentados os detalhes relativos à capacidade de produção e demanda do cliente.

3.2.1 Tempo *takt* atual

Na situação atual, a empresa tem uma demanda diária de 530 peças. Para o cálculo do tempo total disponível, a empresa considera um dia com 21 horas (desconto de 1 hora de refeição por turno) e uma eficiência de 85% (parâmetros da empresa); o que totaliza 17,85 horas úteis por dia. Usando-se a equação 1:

$$\text{Tempo takt} = \frac{17,85 \text{ horas/dia}}{530 \text{ peças/dia}} * 3600 \frac{\text{segundos}}{\text{hora}} = 121,2 \frac{\text{segundos}}{\text{peça}}$$

3.2.2 Comparação de tempos totais entre as operações

A partir dos dados da seção 3.1 e do tempo *takt*, foi possível gerar um gráfico comparativo (Figura 21) entre as capacidades produtivas de cada operação e a demanda do cliente, no qual nota-se claramente o desbalanceamento na situação atual.

O tempo de ciclo é o tempo da operação 10, pois é o gargalo da linha. Por outro lado, há ociosidade na operação 15, uma vez que ela possui tempo de ciclo 23,9 segundos menor que a operação 10. Ou seja, a operação 10 não produz o suficiente para alimentar continuamente a operação 15. Dessa forma, a linha produz uma peça a cada 140,5 segundos, o que está 19,5 segundos acima do tempo *takt*. O resultado é um déficit de 72,6 peças por dia, evidenciando assim a incapacidade de atender a necessidade do cliente.

Na figura a seguir, a linha vermelha é a necessidade diária em quantidade de peças, enquanto que as barras em verde representam a capacidade de cada operação, também em quantidade de peças. São apresentados os tempos de cada operação por peça, ou seja, a operação 10 teve seu tempo dividido por dois, pois cada ciclo produz duas peças, e as operações 20 e 30 tiveram os tempos somados e divididos por quatro, uma vez que são produzidas duas peças por ciclo em duas máquinas simultaneamente.

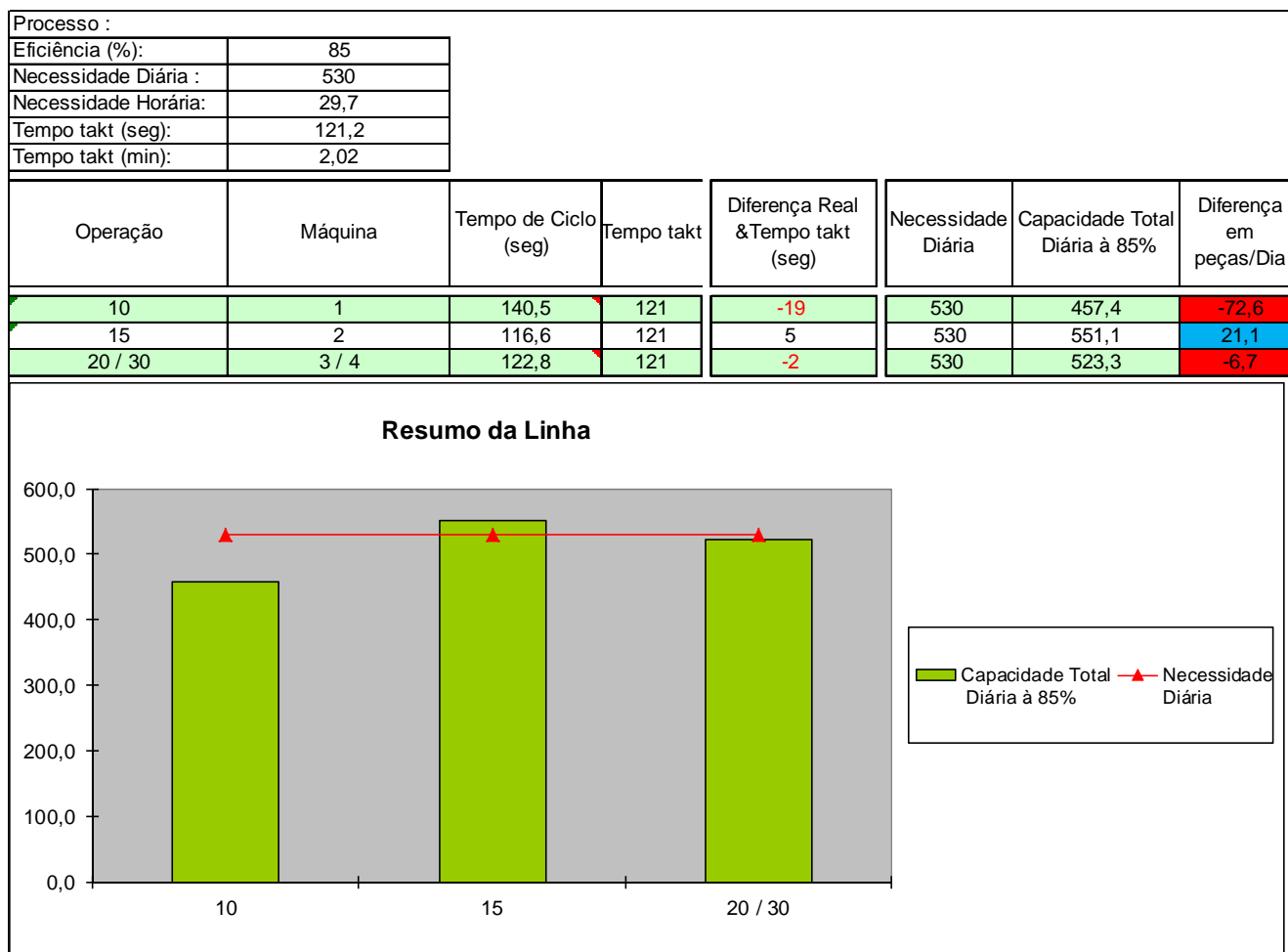


Figura 21 - Resumo da linha

Fonte: Autoria Própria

3.3 Identificação e descrição das restrições de cada tarefa

Num processo de usinagem, muitas operações são pré-requisitos para outras operações. Por exemplo, uma broca de pré-furo deve ser utilizada antes da broca de furação, para por fim, o macho usinar a rosca. No contexto de balanceamento, essas operações pré-sequenciadas são vistas como restrições. Portanto um diagrama de precedência, englobando todas as operações, foi realizado. Existem também as restrições decorrentes da fixação da peça na máquina. Dado um determinado dispositivo de fixação, só é possível a usinagem das faces paralelas ao eixo de giro de mesa da máquina. Além das restrições do diagrama de precedências e da fixação da peça na máquina, existem operações que são fixas em determinadas máquinas devido a alguma condição especial do processo. Dessa forma, a Tabela 7, com as restrições impostas

pelas posições de fixação da peça em cada máquina e condições especiais do processo, foi elaborada.

O diagrama de precedências, a tabela de restrições devido aos dispositivos de fixação e condições especiais do processo e, por fim, a tabela de possibilidades de alocação das tarefas são apresentados nas subseções seguintes.

3.3.1 Diagrama de precedência

Conforme Figura 22, as tarefas 01, 02 e 03 são referência para a fixação das operações 15, 20 e 30, portanto possuem precedência em relação a todas as outras tarefas. As tarefas 09, 10, 11, 20, 21, 25, 35 e 38 são usinagens de rosqueamento, as quais só podem ser usinadas após suas respectivas furações. A tarefa 17 é uma furação que deve ocorrer após a usinagem do furo piloto e a tarefa 19 é a usinagem do chanfro, que deve estar localizada entre a furação e o rosqueamento. As tarefas 26, 29, 36, 40 e 41 são usinagens de pré-acabamento ou acabamento, logo devem ocorrer após seus respectivos desbastes. Assim sendo, o diagrama de precedências, apresentado a seguir na Figura 22, ilustra a sequência de tarefas que deve ser respeitada. As tarefas com balão em verde estão restritas à uma determinada operação, enquanto que as tarefas com balão em azul possuem possibilidade de realocação em pelo menos uma máquina.

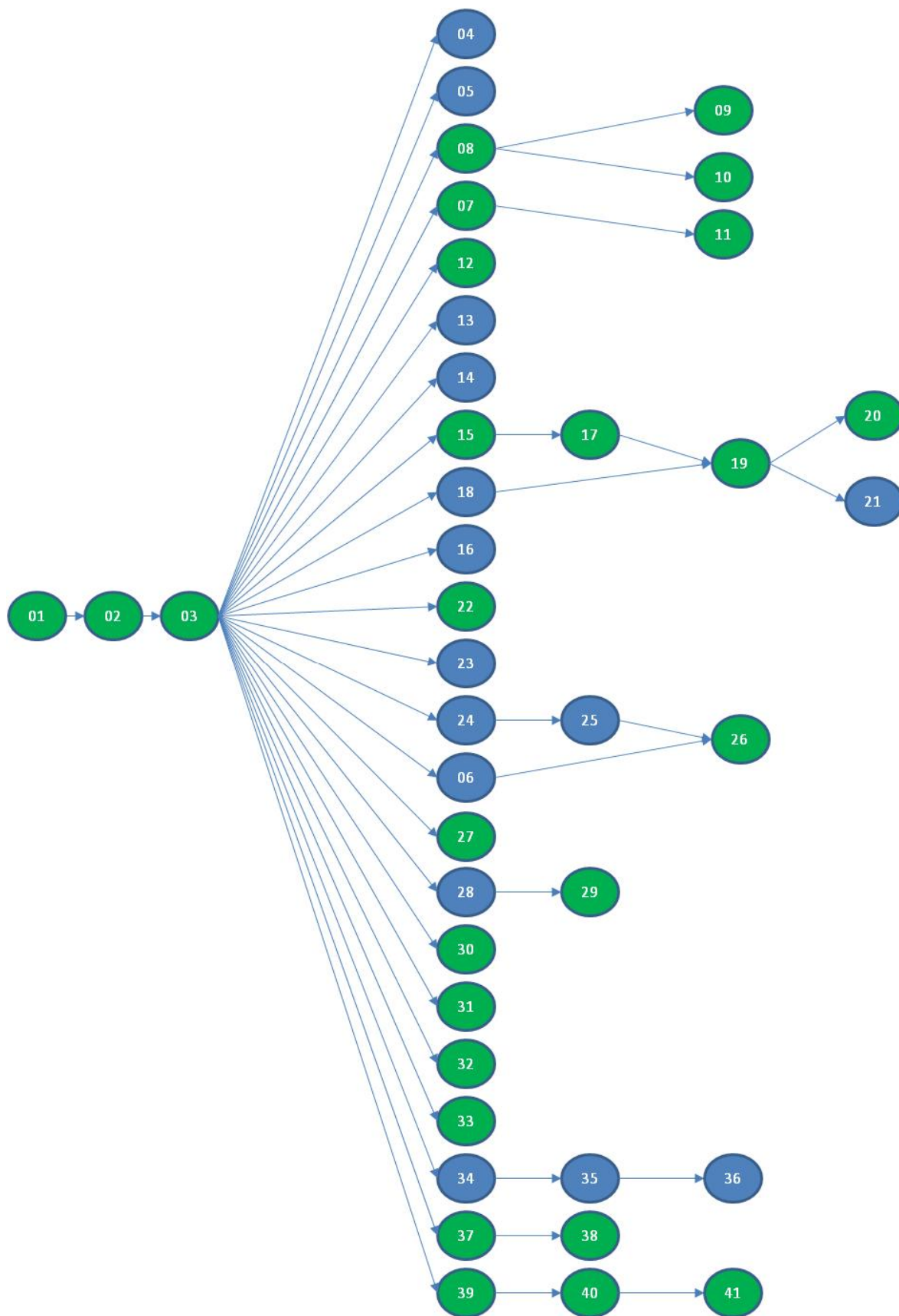


Figura 22 - Diagrama de precedência do processo

Fonte: Autoria Própria

3.3.2 Restrições de fixação e condições especiais

As restrições devido aos dispositivos de fixação e às condições especiais do processo são apresentadas na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 - Restrições das tarefas

Tarefas	Descrição
1, 2 e 3	Devem ser usinadas na OP10, pois são referência para a fixação da OP15, OP20 e OP30.
4, 6, 13, 23, e 28	Sem restrições.
5	Os dispositivos de fixação da OP20 e OP30 não permitem acesso a esses furos.
7, 8, 9, 10 e 11	A fixação da OP15 não permite acesso a face traseira.
12	Deve ser usinada na OP10, pois é a única que possibilita o giro da mesa no ângulo necessário.
14	Essa região é ponto de apoio para a fixação da OP10, logo só pode ser usinada nas operações posteriores.
15, 17 e 20	A fixação da OP15 é a única que permite usinagem em todas as faces necessárias para essa tarefa.
16	Os dispositivos de fixação da OP20 e OP30 não permitem a usinagem dessa tarefa pois haveria colisão entre dispositivo e ferramenta.
18, 19 e 21	Os dispositivos de fixação da OP10 e OP20 não permitem usinagem da face lateral. As tarefas 18 e 21 necessariamente devem ser usinadas na mesma operação para garantir que a furação e rosqueamento ocorram na mesma posição.
22	As máquinas da OP20 e OP30 são as únicas capazes de manter a característica dentro da especificação de tolerância.
24 e 25	Devem ser usinadas na mesma operação para garantir que a furação e o rosqueamento ocorram na mesma posição.
26, 27, 29 e 30	A tolerância de posição entre esses diâmetros é muito precisa, portanto devem ser feitos na mesma fixação. Além disso, utilizando as máquinas das OP20 e OP30 (as últimas da linha), a possibilidade de ocorrerem danos físicos durante o processo é reduzida.
31	A fixação da OP20 é a única que permite usinagem no ângulo necessário.
32	A fixação da OP30 é a única que permite usinagem em todas as faces necessárias para essa tarefa.
33, 37, 38, 39, 40 e 41	Somente a fixação da OP30 permite furação no ângulo necessário.
34, 35 e 36	A fixação da OP15 não permite o acesso a face traseira. Devem ser usinadas na mesma máquina para garantir que a furação e rosqueamento ocorram na mesma posição.
7, 8, 9, 10, 11, 15, 17, 20 e 32	Caso necessário, poder-se-ia dividir cada tarefa em duas tarefas a serem usinadas em máquinas distintas, mas aumentaria o tempo secundário (mais trocas de ferramenta).

Fonte: Autoria Própria

Considera-se uma restrição quando não há a possibilidade da tarefa ser executada em uma determinada máquina. Ou seja, se a tarefa pode ser executada na operação 20 e não na operação 30, isso não determina uma restrição de balanceamento, pois ambas as operações são realizadas nas mesmas máquinas.

Uma hipótese que está implícita no decorrer da descrição das restrições é a de que o desbalanceamento entre as operações será inferior ao tempo de troca de uma ferramenta. Dessa forma, não se justificaria o desmembramento de algumas tarefas que necessitam de uma troca de ferramenta a mais para isso.

3.3.3 Possibilidades de alocação das tarefas

O ponto de partida para a Tabela 7 é que todas as tarefas podem ser usinadas em todas as operações. Porém, com as informações descritas na subseção 3.3.2, foi possível a realização da Tabela 8 para uma melhor visualização das possibilidades de alocação de cada tarefa. A configuração atual de cada operação é exibida com uma marcação na cor verde e as possibilidades de alocação em diferentes operações são exibidas com uma marcação na cor azul. Os tempos de giro de *pallet* são fixos e dependem apenas da máquina em que cada operação é executada. Esses tempos são apresentados logo após a configuração atual de cada operação, uma vez que ocorrem ao final da mesma. As tarefas cujas células do número sequencial estão destacadas na mesma cor devem ser usinadas na mesma operação, conforme restrição da subseção anterior.

Tabela 8 - Tarefas x Possibilidade de Usinagem nas Operações

Tarefas x Possibilidade de Usinagem nas Operações					
Tarefa	Descrição	Op10	Op15	Op20	Op30
01	Fresamento Face Inferior	X			
02	Desbaste dos index de posição	X			
03	Acabamento dos index de posição	X			
04	Fresamento Assento	X	X	X	
05	Furação A	X	X		
06	Desbaste B	X	X	X	
07	Furação para Roscas C	X			
08	Furação para Roscas D e E	X			
09	Rosqueamento D	X			
10	Rosqueamento E	X			
11	Rosqueamento C	X			
12	Furação Inclinada F	X			
GP	Giro de pallet OP 10	X			
13	Furação G	X	X	X	
14	Fresado de alívio		X	X	
15	Furo piloto para Roscas H		X		
16	Fresamento do Canal	X	X		
17	Furação para Roscas H		X		
18	Furação para Roscas I		X		X
19	Chanfros para Roscas H		X		
20	Rosqueamento H		X		
21	Rosqueamento I		X		X
GP	Giro de pallet OP 15		X		
22	Usinagem Faces J e K			X	
23	Furação L	X	X	X	
24	Desbaste M + Furação para Roscas N	X	X	X	
25	Rosqueamento N	X	X	X	
26	Acabamento M			X	
27	Acabamento O			X	
28	Desbaste dos index de posição 2	X	X	X	
29	Acabamento dos index de posição 2			X	
30	Desbaste e Acabamento P			X	
31	Furação Inclinada Q			X	
GP	Giro de pallet OP 20			X	
32	Fresamento Faces Laterais				X
33	Furação R				X
34	Desbaste S + Furação T	X			X
35	Rosqueamento T	X			X
36	Acabamento S	X			X
37	Furação U				X
38	Rosqueamento U				X
39	Desbaste V + Chanfro				X
40	Pré Acabamento V + M				X
41	Acabamento V + M				X
GP	Giro de pallet OP 30				X

Legenda	
X	Processo Atual
X	Possível Alteração
	Devem ser usinadas na mesma operação

Fonte: Autoria Própria

3.4 Validação do método de estimativa de tempos

Na empresa já existe um método de estimativa de tempos através de uma planilha Excel. Para o cálculo do tempo efetivo de usinagem, são relacionados o diâmetro e o número de arestas cortantes da ferramenta, parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço por aresta cortante) e o comprimento total percorrido em avanço programado (G01), conforme o equacionamento descrito na seção 2.2. Para o cálculo do tempo secundário, são relacionados os dados da máquina (velocidade e aceleração dos eixos), comprimento total percorrido em avanço rápido (G0), tempo de troca de ferramenta, tempo de giro de mesa (quando aplicável) e tempo de giro de *pallet*.

Todos os parâmetros de corte foram coletados diretamente no programa CNC das máquinas e introduzidos diretamente na planilha. Também, os tempos secundários de giro de *pallet*, giro de mesa e troca de ferramenta foram cronometrados para cada máquina, a fim de traduzir com maior precisão a realidade do processo.

Para obter-se o tempo total de uma operação, é necessário somar o tempo efetivo de usinagem com o tempo secundário. Assim sendo, foram estimados os tempos de todas as tarefas na configuração atual. Em algumas tarefas, ocorreu uma maior divergência entre tempo real e estimado. Para esses casos, os parâmetros comprimento total de usinagem e comprimento total percorrido em avanço rápido, que inicialmente foram determinados através da análise das dimensões da peça e do dispositivo de fixação, foram ajustados nos tempos teóricos. Esse ajuste é justificável com base na maior dificuldade de determinação e, conseqüentemente, menor precisão dos valores desses parâmetros. Por fim, os tempos finais estimados foram comparados com os tempos coletados na linha. A seguir, a Tabela 9 apresenta os tempos medidos e estimados para cada tarefa.

Tabela 9 - Tempo real da tarefa x tempo estimado

Tarefa	Descrição	Medido	Estimado
01	Fresamento Face Inferior	53,2	51,7
02	Desbaste dos index de posição	19,3	21,3
03	Acabamento dos index de posição	11,7	10,8
04	Fresamento Assento	13,5	12,7
05	Furação A	29,4	28,5
06	Desbaste B	39,2	39,3
07	Furação para Roscas C	16,1	15,3
08	Furação para Roscas D e E	26,7	27,9
09	Rosqueamento D	26	25,5
10	Rosqueamento E	6,9	6,6
11	Rosqueamento C	15	14,5
12	Furação Inclinada F	18	17,9
13	Furação G	4,1	4,1
14	Fresado de alívio	10	10,4
15	Furo piloto para Roscas H	17,8	19,6
16	Fresamento do Canal	6,2	5,6
17	Furação para Roscas H	24,7	27,1
18	Furação para Roscas I	6,1	5,7
19	Chanfros para Roscas H	5	4,6
20	Rosqueamento H	29,2	28,1
21	Rosqueamento I	10,1	8,6
22	Usinagem Faces J e K	26,3	24,1
23	Furação L	15	14,3
24	Desbaste M + Furação para Roscas N	54,1	54,8
25	Rosqueamento N	11,8	11,8
26	Acabamento M	34,3	34
27	Acabamento O	42,9	43,3
28	Desbaste dos index de posição 2	17	19,1
29	Acabamento dos index de posição 2	16,9	16,7
30	Desbaste e Acabamento P	22,8	22,9
31	Furação Inclinada Q	24,9	24
32	Fresamento Faces Laterais	32,7	33,6
33	Furação R	8,8	9,8
34	Desbaste S + Furação T	27	25,3
35	Rosqueamento T	19,8	20,1
36	Acabamento S	17	18,9
37	Furação U	12,9	11,9
38	Rosqueamento U	15,4	14
39	Desbaste V + Chanfro	20,2	19,5
40	Pré Acabamento V + M	33	32,6
41	Acabamento V + M	26,2	26,6

Fonte: Autoria Própria

3.5 Estimativas dos tempos de todas as operações em todas as máquinas

Ao estimar o tempo de usinagem de uma determinada tarefa em diferentes máquinas, todos os parâmetros de corte foram mantidos de acordo com os coletados na seção 3.4, uma vez que o objetivo do presente trabalho é o balanceamento e não o aperfeiçoamento de tais parâmetros. Dessa forma, o impacto dos valores destes parâmetros é o mínimo possível em outras questões do processo, como a qualidade da peça e vida útil das ferramentas.

Com o método de estimativa de tempos validado através da Tabela 9, obteve-se os tempos das tarefas com possibilidade de realocação nas demais máquinas. Dessa forma, a Tabela 8 foi modificada a fim de apresentar os tempos de todas as tarefas em todas as máquinas possíveis. Por fim, os dados da Tabela 10 são os parâmetros de entrada da modelagem matemática.

Tabela 10 - Tempos de todas as tarefas em todas as operações possíveis

Tarefas x Possibilidade de Usinagem nas Operações					
Tarefa	Descrição	Op10	Op15	Op20	Op30
01	Fresamento Face Inferior	53,2			
02	Desbaste dos index de posição	19,3			
03	Acabamento dos index de posição	11,7			
04	Fresamento Assento	13,5	9	18,4	
05	Furação A	29,4	18,3		
06	Desbaste B	39,2	30,5	71,6	
07	Furação para Roscas C	16,1			
08	Furação para Roscas D e E	26,7			
09	Rosqueamento D	26			
10	Rosqueamento E	6,9			
11	Rosqueamento C	15			
12	Furação Inclinada F	18			
GP	Giro de pallet OP 10	6			
13	Furação G	6,4	4,1	8,8	
14	Fresado de alívio		10	22,7	
15	Furo piloto para Roscas H		17,8		
16	Fresamento do Canal	7,9	6,2		
17	Furação para Roscas H		24,7		
18	Furação para Roscas I		6,1		12,9
19	Chanfros para Roscas H		5		
20	Rosqueamento H		29,2		
21	Rosqueamento I		10,1		16,8
GP	Giro de pallet OP 15		3,4		
22	Usinagem Faces J e K			26,3	
23	Furação L	9,2	6,5	15	
24	Desbaste M + Furação para Roscas N	29,4	24,1	54,1	
25	Rosqueamento N	7,9	5,3	11,8	
26	Acabamento M			34,3	
27	Acabamento O			42,9	
28	Desbaste dos index de posição 2	13	8,9	17	
29	Acabamento dos index de posição 2			16,9	
30	Desbaste e Acabamento P			22,8	
31	Furação Inclinada Q			24,9	
GP	Giro de pallet OP 20			6	
32	Fresamento Faces Laterais				32,7
33	Furação R				8,8
34	Desbaste S + Furação T	14,6			27
35	Rosqueamento T	12,1			19,8
36	Acabamento S	11,5			17
37	Furação U				12,9
38	Rosqueamento U				15,4
39	Desbaste V + Chanfro				20,2
40	Pré Acabamento V + M				33
41	Acabamento V + M				26,2
GP	Giro de pallet OP 30				6

Legenda	
X	Processo Atual
X	Possível Alteração
	Devem ser usinadas na mesma operação

Fonte: Autoria Própria

3.6 Modelagem matemática

Como indicado na Figura 1, na seção 1.2, cada máquina contém dois *pallets*. Na máquina 1, que realiza a operação 10, cada *pallet* suporta duas peças, sendo usinadas duas peças, simultaneamente. Na máquina 2, cada *pallet* suporta apenas uma peça para realizar a operação 15, sendo usinada uma peça por vez.

Há duas máquinas (as máquinas 3 e 4) para realizar as operações 20 e 30. Nestas máquinas, o *pallet* 1 suporta duas peças para realizar a operação 20 e o *pallet* 2 suporta duas peças para a operação 30. Diferentemente da máquina 1, a cada giro de *pallet* nas máquinas 3 e 4 são usinadas duas peças não simultaneamente. Portanto, o tempo das operações 20 e 30 são os tempos necessários para a usinagem de duas peças. Dessa maneira, 100% das peças passam pelas duas primeiras máquinas e, a partir daí, o fluxo é dividido igualmente entre as máquinas 3 e 4.

Conforme pode-se notar pela Figura 1 da seção 1.2, com base na quantidade de máquinas de cada operação e a quantidade de peças produzidas por ciclo, a linha e usinagem estará balanceada quando a metade do tempo da operação 10 for igual ao tempo da operação 15 e, também, igual à quarta parte do somatório dos tempos das operações 20 e 30.

A modelagem matemática foi implementada no software Gams/CPLEX, versão 23.3.3, utilizando-se o equacionamento descrito na seção 2.3, onde a expressão 6 é a função objetivo de minimizar a diferença entre o tempo de ciclo (tempo da operação gargalo) e os tempos das demais operações, e equações e inequações 7, 9, 10 e 11 que garantem as demais restrições. Os parâmetros de entrada no modelo matemático são tanto a Tabela 10 como a Figura 22, respectivamente, tempos de todas as tarefas em todas as máquinas possíveis e diagrama de precedências, uma vez que ambas as informações são necessárias para respeitar todas as restrições e possibilidades do processo.

A solução ótima foi encontrada pelo modelo matemático com tempo total (geração do modelo e processamento no solver) de 0,14 segundos e 106 iterações.

4 RESULTADOS

A Tabela 11, a seguir, mostra a alocação resultante das tarefas. Nota-se que a configuração resultante (destacada com preenchimento das células em azul, conforme legenda) não desrespeita as possibilidades de alocação das tarefas. Percebe-se também que a equação 10, restrição das tarefas que devem ocorrer na mesma máquina, também foi respeitada, pois todas as tarefas destacadas de acordo com a legenda ocorreram nas mesmas máquinas. Além disso, cada tarefa foi usinada exatamente uma vez, conforme equação 7.

A Figura 23 compara os tempos de cada operação por peça e o tempo *takt*. Nota-se o desbalanceamento máximo de 2,6 segundos entre as máquinas 3 e 4 (operações 20/30) que são o gargalo e a máquina 2 (operação 15), representando grande melhoria em relação a situação atual, em que o gargalo é a máquina 1 (operação 10), com desbalanceamento máximo de 23,9 segundos para a máquina 2 (operação 15).

O tempo *takt* não foi alcançado e ainda há um *gap* de 24,8 peças entre a demanda e a produção diária, porém, analisando a capacidade produtiva dos gargalos da situação atual e do resultado, obteve-se um ganho de 47,7 peças na produção diária ou 10,4% de produtividade a mais (redução do tempo de ciclo de 140,5 para 127,2 segundos).

Mediante análise simultânea do diagrama de precedências com a tabela de possibilidade de alocação das tarefas, foram feitas algumas simplificações. As tarefas 1, 2 e 3, 7, 8, 9, 10 e 11 são todas fixas na operação 10, ou seja, não é possível que nenhuma tarefa para a qual elas são precedentes ocorra anteriormente, pois já estão alocadas na máquina 1. Logo, elas foram eliminadas do diagrama na Figura 24. Dessa forma, as tarefas 04, 05, 12, 13, 14, 16, 22, 23, 27, 30, 31, 32, 33 ficam sem nenhuma precedência, sendo também eliminadas. A Figura 24 relaciona o diagrama de precedências simplificado com as operações em que cada tarefa é executada, mostrando que a inequação 9, restrição de precedências, é atendida e a configuração resultante é válida.

Tabela 11 - Alocação resultante das tarefas

Tarefas x Possibilidade de Usinagem nas Operações					
Tarefa	Descrição	Op10	Op15	Op20	Op30
01	Fresamento da Face Inferior	53,2			
02	Desbaste dos index (2x)	19,3			
03	Acabamento dos index (2x)	11,7			
04	Fresamento Assento 137.8	13,5	9	18,4	
05	Furos Ø8,925 (9x)	29,4	18,3		
06	Desbaste do Ø67 (2x) + R54.5	39,2	30,5	71,6	
07	Furação para Roscas M22 (2x)	16,1			
08	Furação p/ Roscas M10 e M14	26,7			
09	Roscas M10x1,25 (5x)	26			
10	Rocas M14x1,5 3H	6,9			
11	Roscas M22x1,5	15			
12	Furação Inclinada Ø16	18			
GP	Giro de pallet OP 10	6			
13	Furo Ø11 (1x)	6,4	4,1	8,8	
14	Fresado de alívio		10	22,7	
15	Furo piloto M8x1,25 (5x)		17,8		
16	Fresamento do Canal	7,9	6,2		
17	Furação M8x1,25 (12x)		24,7		
18	Furação M10x1,25 (1x)		6,1		12,9
19	Chanfros M8 (2x) e M10 (1x)		5		
20	Roscas M8x1,25 (12x)		29,2		
21	Roscas M10x1,25 (1x)		10,1		16,8
GP	Giro de pallet OP 15		3,4		
22	Usinagem das Faces 163,8 e 52			26,3	
23	Furo Ø5 (1x)	9,2	6,5	15	
24	Desbaste Ø14 (3x) + Pré-furo M18	29,4	24,1	54,1	
25	Rosca M18x1,5 (1x)	7,9	5,3	11,8	
26	Acabamento Ø14 (3x) / Ø67 (2x)			34,3	
27	Acabamento Ø105,990 (1x)			42,9	
28	Desbaste Index Ø12 (2x)	13	8,9	17	
29	Acabamento Index Ø12 (2x)			16,9	
30	Desbaste / Acabamento Ø40 (1x)			22,8	
31	Furo Inclinado Ø10 (1x)			24,9	
GP	Giro de pallet OP 20			6	
32	Fresamento Faces Laterais				32,7
33	Furo Ø8,6 (1x)				8,8
34	Desbaste Ø11,18 + Pré-Furo M14 (3x)	14,6			27
35	Rosca M14x1,5 6H (3x)	12,1			19,8
36	Acabamento Ø11,18 (3x)	11,5			17
37	Pré-Furo M6x1 (2x)				12,9
38	Rosca M6x1 (2x)				15,4
39	Desbaste Ø28 + Chanfro				20,2
40	Pré Acabamento Ø28 / Ø14				33
41	Acabamento Ø28 / Ø14				26,2
GP	Giro de pallet OP 30				6

Legenda	
X	Processo Atual
X	Possível Alteração
	Configuração resultante
	Devem ser usinadas na mesma operação

Fonte: Autoria Própria

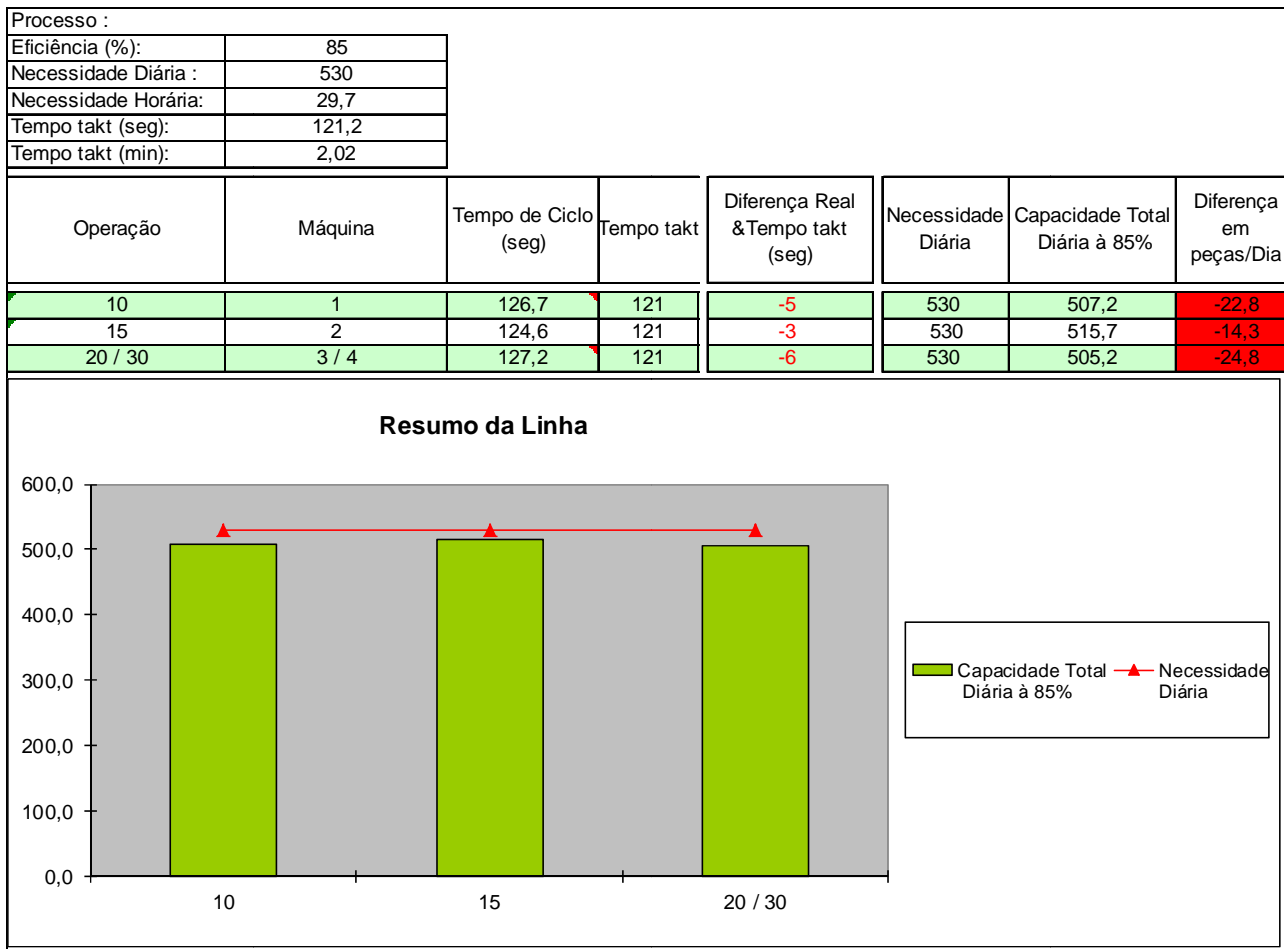


Figura 23 - Resumo resultante da linha

Fonte: Autoria Própria

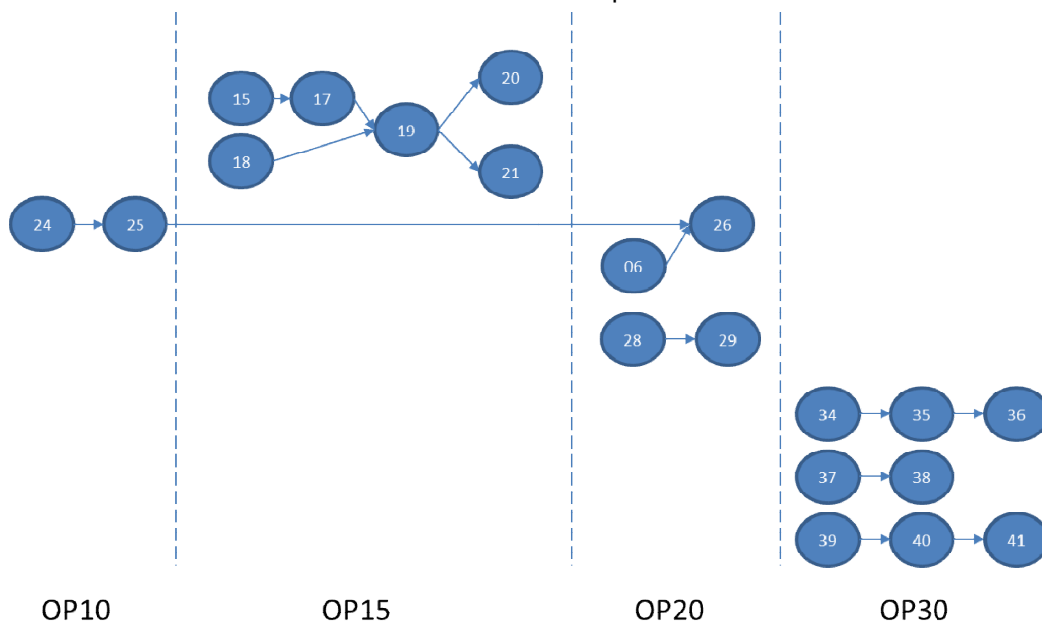


Figura 24 - Diagrama de precedência simplificado

Fonte: Autoria Própria

Reduções posteriores nos tempos de ciclo, a partir de agora, são possíveis através de reduções dos tempos individuais de usinagem das tarefas, ou seja, possíveis melhorias nos parâmetros de corte, reduções de tempo secundário, eliminação de tarefas de desbaste, dentre outros, que não foram o foco do presente trabalho. Outra forma de aumentar a produção diária, além da redução do tempo de ciclo, é investir no aumento de eficiência da linha, que historicamente é de 85%. A eficiência a ser alcançada é de 89,2% (conforme equação a seguir), resultando num aumento de produtividade suficiente para atender a demanda diária de 530 peças (tempo *takt* de 121 segundos). Pode-se também revezar o horário de refeição de pelo menos um turno, de forma a ganhar uma hora a mais de produção por dia. Com essa alternativa, a produção diária também alcançaria a demanda de 530 peças. As equações a seguir, que nada mais são do que a equação 1 (tempo *takt*) adaptada, mostram o cálculo da primeira e segunda alternativa, respectivamente.

$$\textit{Produção diária} = \frac{\textit{Tempo total disponível/dia}}{\textit{Tempo de Ciclo}} = \frac{21 * 3600 * 0,892}{127,2} = 530 \frac{\textit{peças}}{\textit{dia}}$$

$$\textit{Produção diária} = \frac{\textit{Tempo total disponível/dia}}{\textit{Tempo de Ciclo}} = \frac{22 * 3600 * 0,85}{127,2} = 530 \frac{\textit{peças}}{\textit{dia}}$$

5 CONCLUSÕES

Neste TCC foi avaliado o problema de balanceamento de uma linha de usinagem. Considerando o que foi apresentado nesta proposta, conclui-se que o projeto foi viável, uma vez que as necessidades pertinentes ao trabalho estiveram ao alcance da equipe. A empresa parceira, que já está ciente do trabalho, concordou em fornecer todos os dados necessários da linha, as folhas de processo e métodos de estimativas já existentes.

O cronograma foi realizado baseado no tempo disponível dos alunos e de acordo com o calendário do TCC2. O orçamento encontrou-se dentro da realidade dos alunos. As aulas semanais da equipe com o professor, ao longo do TCC1, facilitaram a comunicação entre as duas partes, possibilitando assim, uma maior proximidade e melhores resultados. A experiência do professor também foi necessária e determinante para o sucesso do projeto, uma vez que já realizou projetos similares anteriormente.

O resultado deste trabalho foi uma possibilidade de redução do tempo de ciclo de 140,5 para 127,2 segundos, ou seja, um ganho de 10,4% (47,7 peças na produção diária) de produtividade. O investimento necessário para a implementação desses resultados na empresa é muito baixo, uma vez que o balanceamento não requer a compra de máquinas. No caso em questão, seria necessário apenas a compra das pinças de fixação de ferramentas para as tarefas que foram realocadas da máquina 2 (OP15) para outras máquinas ou das outras máquinas para a máquina 2, uma vez que essa máquina utiliza outro padrão de fixação.

Melhorias no processo de usinagem são necessárias, pois o tempo de ciclo resultante ainda é maior do que o tempo *takt* e, conseqüentemente, ainda há incapacidade da linha de produção em atender a demanda. Esses pontos de melhoria, conforme propostas da seção anterior, podem ser melhor analisados e explorados em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Adiel T.; SOUZA, Fernando M. C. **Produção & Competitividade: Aplicações e Inovações**. Recife: Editora UFPE, 2000. 2-9 p.
- ALVAREZ & ANTUNES JR. **Takt-time: Conceitos e Contextualização Dentro do Sistema Toyota de Produção**. São Carlos: UFSCAR, 2001. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/gp/v8n1/v8n1a01.pdf> Acesso em: 05 maio de 2012. 6-9 p.
- BATTINI, D., FACCIO, M. Persona, A. e SGARBOSSA, F., **Balancing–sequencing procedure for a mixed model assembly system in case of finite buffer capacity**, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2009, vol 44, 345-359p.
- BECKER, C. e SCHOLL, A., **A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing**, European Journal of Operational Research, 2006, vol 168, 694-715p.
- BOCK, S., ROSENBERG, O. e BRACKEL, T. V., **Controlling mixed-model assembly lines in real-time by using distributed systems**, European Journal of Operational Research, 2006, vol 168, 880-904p.
- BOYSEN, N., FLIEDNER, M., SCHOLL, A., **A classification of assembly line balancing problems**. European Journal of Operational Research, 2007, vol 183, 674-693p. 2007, vol 33, 1212-1221p.
- CIMM, **Variáveis e parâmetros de corte**. Florianópolis, 2012. Disponível em http://www.cimm.com.br/portal/noticia/material_didatico/4861 Acesso em: 02 de Maio de 2012.
- MARCILIO, Ivair; SKRABA, Marco., **Otimização do balanceamento de uma linha de montagem de cabines de caminhões por meio de programação linear inteira mista**, XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2011, Ubatuba-SP.
- OHNO, T., **Sistema Toyota de Produção – Além da Produção em Larga Escala**. Porto Alegre: Editora Bookman, 1997.
- RAJAKUMAR, S., ARUNACHALAM, V. P. e SELLADURAI, V., **Workflow balancing in parallel machines through genetic algorithm**, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2006.