



ARTIGO ORIGINAL

OPEN ACCESS

MELHORIA DO PROCESSO DE FRESAMENTO DE DENTES DE ENGENRAGEM: ESTUDO DE CASO EM UMA PEQUENA EMPRESA

IMPROVEMENT OF THE GEAR TOOTH MILLING PROCESS: A CASE STUDY IN A SMALL COMPANY

MEJORA DEL PROCESO DE FRESADO DE DIENTES DE ENGRANAJES: UN ESTUDIO DE CASO EN UNA PEQUEÑA EMPRESA

Marco Aurélio Feriotti ^{1*}, Eduardo Florêncio Lima Neto ², Alexandre Formigoni ³, & José Martino Neto ⁴

¹³ Centro Estadual De Educação Tecnológica Paula Souza (Ceeteps) ²⁴ Faculdade De Tecnologia (Fatec-Guarulhos)

^{1*} marco.a.feriotti@gmail.com ² eduardo@nepec.com.br ³ a_formigoni@yahoo.com.br ⁴ jose.martino@fatec.sp.gov.br

ARTIGO INFO.

Recebido: 15.01.2023

Aprovado: 05.06.2023

Disponibilizado: 15.06.2023

PALAVRAS-CHAVE: Métodos de usinagem; centro de usinagem vertical; ferramentas de corte.

KEYWORDS: Machining methods vertical machining center; cutting tools.

PALABRAS CLAVE: Métodos de mecanizado; centro de mecanizado vertical; herramientas de corte.

*Autor Correspondente: Feriotti, M. A.

RESUMO

O aumento da competitividade e a busca pela eficiência levam as empresas a otimizar seus processos de produção, incluindo a usinagem, que é amplamente utilizada na indústria. Este estudo focou na melhoria do processo de fresamento de dentes de engrenagem em uma pequena empresa com o objetivo de aumentar a produtividade. Para atingir esse objetivo, foram estabelecidos objetivos específicos, como mapear o tempo do processo atual, avaliar a vida útil da ferramenta utilizada, realizar testes práticos com uma nova proposta de ferramenta e analisar os resultados. O estudo foi baseado em uma pesquisa bibliográfica sobre melhorias no processo de usinagem e ferramentas de corte e estudo de caso utilizando estratégias de usinagem, mapeamento de tempos e vida útil da ferramenta antes e depois da implementação de medidas de melhoria. Os resultados de testes realizados demonstraram a eficácia das ações realizadas, como aumento da capacidade produtiva e eficiência da empresa, destacando como fator importante a seleção adequada de ferramentas de corte e parâmetros de usinagem para garantir a qualidade do processo de usinagem. Foram sugeridas a continuação do trabalho em outras máquinas da empresa. Este estudo demonstrou que a otimização do processo de usinagem pode trazer melhorias competitivas para a empresas.

ABSTRACT

The increase in competitiveness and the pursuit of efficiency lead companies to optimize their production processes, including machining, which is widely used in the industry. This study focused on improving the gear milling process in

a small company with the aim of increasing productivity. To achieve this goal, specific objectives were established, such as mapping the current process time, evaluating the tool's lifespan, conducting practical tests with a new tool proposal, and analyzing the results. The study was based on a literature review on machining process improvements and cutting tools and a case study using machining strategies, time mapping, and tool lifespan before and after implementing improvement measures. The test results demonstrated the effectiveness of the actions taken, such as increased production capacity and company efficiency, highlighting the proper selection of cutting tools and machining parameters as an important factor in ensuring the quality of the machining process. Continuing work on other machines in the company was suggested. This study demonstrated that optimizing the machining process can bring competitive improvements to companies.

RESUMEN

El aumento de la competitividad y la búsqueda de eficiencia llevan a las empresas a optimizar sus procesos de producción, incluyendo el mecanizado, que es ampliamente utilizado en la industria. Este estudio se centró en mejorar el proceso de fresado de engranajes en una pequeña empresa con el objetivo de aumentar la productividad. Para lograr este objetivo, se establecieron objetivos específicos, como mapear el tiempo del proceso actual, evaluar la vida útil de la herramienta utilizada, realizar pruebas prácticas con una nueva propuesta de herramienta y analizar los resultados. El estudio se basó en una revisión bibliográfica sobre mejoras en el proceso de mecanizado y herramientas de corte, y un estudio de caso utilizando estrategias de mecanizado, mapeo de tiempos y vida útil de la herramienta antes y después de implementar medidas de mejora. Los resultados de las pruebas realizadas demostraron la eficacia de las acciones tomadas, como el aumento de la capacidad productiva y la eficiencia de la empresa, destacando la selección adecuada de herramientas de corte y parámetros de mecanizado como un factor importante para garantizar la calidad del proceso de mecanizado. Se sugirió continuar el trabajo en otras máquinas de la empresa. Este estudio demostró que la optimización del proceso de mecanizado puede traer mejoras competitivas para las empresas.



1. INTRODUÇÃO

Devido à alta competitividade do mercado atual, é necessário que os gestores alinhem estrategicamente seus processos desde o início de suas atividades empresariais (Costa et al., 2019). A indústria procura cada vez mais inovação, seja em novos produtos ou em novos e mais eficientes métodos de produção. Essa realidade reforça a necessidade de otimizar o tempo, melhorar a qualidade e reduzir os custos de produção dos produtos (Lafin, 2018).

A usinagem pode ser definida como um processo de fabricação mecânica que utiliza ferramentas de corte para remover material de uma peça bruta e transformá-la em uma peça acabada com dimensões, tolerâncias e acabamentos superficiais desejados (Klocke, 2011).

O fresamento é um processo de usinagem de remoção de material que visa à obtenção de diferentes superfícies utilizando vários tipos de ferramentas. A ferramenta gira em torno de seu próprio eixo e a peça é fixada diretamente na mesa ou em uma morsa e se move ao longo de uma trajetória cartesiana. Trata-se do fresamento tangencial ou faceamento, os dois tipos básicos mais utilizados nesses processos de usinagem (Ferraresi, 2018).

No setor de prestação de serviços de usinagem, a empresa torna-se competitiva quando realiza seus processos com qualidade, repetibilidade, rapidez e baixo custo. Ao ajustar e mudar o processo em busca da melhoria contínua, os desperdícios são eliminados por meio da pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias (Silva, 2019).

O estudo de caso foi motivado pela necessidade do cliente de terceirizar um grande volume de peças, o que exigiu que a empresa em questão aumentasse sua capacidade produtiva e eficiência para atender a essa demanda.

O problema desta pesquisa decorre do fato de que a usinagem da peça ser realizada em uma máquina onde os parâmetros de usinagem são pré-determinados em função da ferramenta, a partir desse contexto a questão é: Quais são os efeitos da otimização do processo de fresamento de dentes de engrenagens, incluindo a seleção adequada de ferramentas de corte e parâmetros de usinagem, na produtividade e eficiência e custos envolvidos de uma pequena empresa na fabricação de engrenagens?

A avaliação da aplicação de um método de usinagem mais eficiente foi realizada por meio de um estudo de caso com uma empresa do setor denominada “Alfa”, que existe há 16 anos e atua na prestação de serviços de usinagem para diversas indústrias. Este estudo foi baseado em pesquisa bibliográfica realizada por meio da plataforma Google Scholar, limitou-se ao período de 2010 a 2022, é importante destacar que os avanços na tecnologia de usinagem e no desenvolvimento de novas ferramentas e técnicas são um processo contínuo e evolutivo, e que esse foi um período em que muitos desses avanços começaram a se consolidar e a ganhar destaque na pesquisa científica e na indústria, principalmente para usinagem de alta velocidade (HSM) e os novos materiais para ferramentas, como a cerâmica. A sintaxe de busca foi: “Melhorias no processo de usinagem”; “Ferramentas de corte” e; “Desempenho de processo de fresagem”.



O objetivo geral estabelecido foi melhorar o processo de fresamento de dentes de uma engrenagem em um centro de usinagem vertical e aumentar a produtividade. A partir dessa questão principal, surgem objetivos específicos:

- i. Mapear o tempo de processo atual;
- ii. Avaliar a vida útil da ferramenta utilizada atualmente;
- iii. Realizar testes práticos com outra proposta de ferramenta de corte;
- iv. Analisar os resultados obtidos e comparar com o processo atual.

O trabalho foi dividido em quatro capítulos. O segundo capítulo traz um breve apanhado bibliográfico sobre serviços de usinagem, centro de usinagem vertical e processos de usinagem. O terceiro capítulo apresenta a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho. A partir do quarto capítulo são realizadas todas as análises e apresentações de testes realizados em um centro de usinagem CNC, onde são explicadas estratégias de usinagem, mapeamento de tempos de usinagem e vida útil da ferramenta antes e depois da publicação dos parâmetros utilizados e implementação de medidas de melhoria relevantes. No quinto capítulo, são apresentados os resultados efetivos de todo o trabalho por meio dos dados coletados no estado passado e atual. Dessa forma, verifica-se a eficácia da ação e atingem-se os objetivos traçados do trabalho. Após a avaliação dos resultados, são apresentadas conclusões e sugestões para a continuação da execução do trabalho para outras máquinas do setor de trabalho.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção apresenta um resumo da literatura sobre a teoria que trata dos principais assuntos do problema de pesquisa. Portanto, esta revisão bibliográfica foi baseada em citações de autores selecionados e publicações pertinentes à fundamentação teórica deste trabalho.

2.1 Métodos de Usinagem

A usinagem é um processo de fabricação que envolve a remoção de material de uma peça bruta para produzir uma peça com formato, dimensões e acabamento desejados. É realizada com a ajuda de ferramentas de corte, como brocas, fresas, entre outras. A ferramenta de corte é pressionada contra a superfície da peça bruta, fazendo com que o material seja removido e dando forma à peça (Machado et al., 2009).

Qualquer processo de usinagem tem dois tipos de variáveis inter-relacionadas. São as variáveis de entrada (independentes) e de saída (dependentes) (El-Hofy, 2018).

A. Variáveis de entrada (independentes):

- Material da peça, como composição e recursos metalúrgicos;
- Geometria inicial da peça de trabalho, incluindo processos anteriores;
- Seleção do processo, que pode ser convencional ou não convencional;
- Material da ferramenta;
- Parâmetros de usinagem;
- Dispositivos de fixação;
- Fluidos de corte.

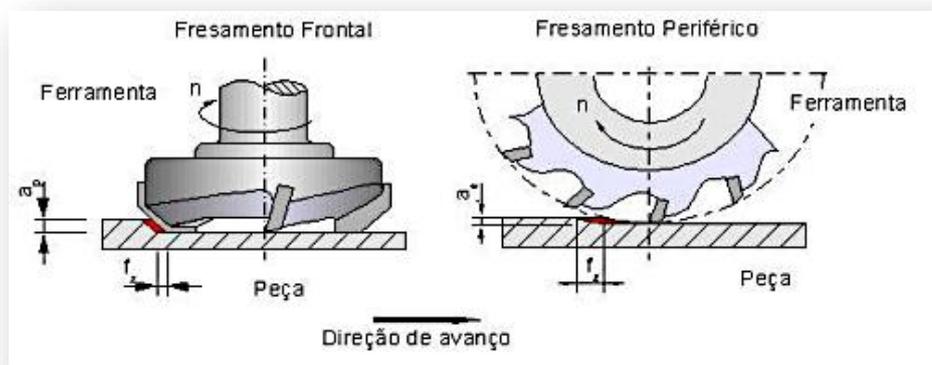


B. Variáveis de saída (dependentes):

- Força e potência de corte;
- Influência a deflexão e vibração;
- Precisão da peça acabada;
- Geração de calor e conseqüentemente desgaste da ferramenta;
- Geometria do produto acabado;
- Propriedades mecânicas desejadas;
- Acabamento de superfície.

O fresamento é um processo de usinagem que envolve a remoção de material de uma peça através do movimento rotativo de uma ferramenta de corte chamada fresa (Klocke, 2011). O processo de fresamento é aplicado com uma ferramenta realizando movimento rotacional e translacional compartilhado entre a peça e a ferramenta (Stoeterau, 2004). A Figura 1 mostra o processo para o fresamento topo e frontal.

Figura 1. Cinemática do processo de Fresamento



Fonte: Stoeterau (2004)

Começa com a fixação da peça em uma máquina fresadora. A fresa é então montada no cabeçote da máquina e posicionada de modo que seus dentes estejam em contato com a superfície da peça. A máquina fresadora é então ligada e a fresa começa a girar em alta velocidade, enquanto se move em uma trajetória definida pela programação da máquina. Existem diferentes tipos de fresas, como fresas de topo, fresas de perfil e fresas de engrenagem, cada uma projetada para um tipo específico de corte (Klocke, 2011).

Esse é um processo que exige conhecimentos de geometria, mecânica dos materiais, mecânica dos fluidos, entre outras áreas. A importância da seleção adequada da ferramenta de corte, dos parâmetros de usinagem e da lubrificação, influenciam diretamente na garantia a qualidade do produto final e na eficiência da usinagem (Machado et al., 2009).

A economia do processo de usinagem é governada pela velocidade de corte e outras variáveis, bem como pelo custo e fatores econômicos. A economia de usinagem representa um aspecto importante. Aspectos ecológicos e riscos à saúde devem ser considerados e eliminados tomando as medidas necessárias (El-Hofy, 2018).



2.2 Centro de Usinagem Vertical

Os aspectos da máquina-ferramenta incluem diversos elementos, como a estrutura, o sistema de acionamento, o sistema de controle, o sistema de lubrificação e o sistema de refrigeração. A máquina-ferramenta é um equipamento complexo que envolve diversos aspectos, desde a estrutura até os sistemas de lubrificação e refrigeração. A escolha adequada da máquina-ferramenta e a manutenção regular desses sistemas são essenciais para garantir a qualidade e a eficiência do processo de usinagem (Diniz et al., 2014).

O desenvolvimento de máquinas-ferramenta é significativamente impulsionado pelo preço mais baixo e maior capacidade operacional de dispositivos eletrônicos, novos tipos de acionamentos, especialmente motores lineares. Esse favorecimento, aliado à demanda do mercado por máquinas capazes de produzir com a maior qualidade, no menor tempo possível e com a máxima flexibilidade de produção, levou ao desenvolvimento de máquinas-ferramenta que permitem a produção de peças com o maior variedade possível (Stoeterau, 2004).

A estrutura da máquina-ferramenta é responsável por suportar todas as cargas dinâmicas e estáticas que ocorrem durante o processo de usinagem. Essa estrutura deve ser rígida e estável para garantir a precisão e a qualidade do produto final. O sistema de acionamento é composto pelos motores elétricos ou hidráulicos que fornecem a potência necessária para movimentar as peças e ferramentas durante a usinagem. Esses motores devem ser capazes de fornecer uma ampla faixa de velocidades e torques para atender aos diferentes requisitos de usinagem (Diniz et al., 2014).

O centro de usinagem vertical é uma máquina-ferramenta extremamente versátil, projetada para uma ampla gama de aplicações de usinagem, desde ambientes de fabricação até oficinas de ferramentas. Além de estabilidade geométrica, precisão, alto desempenho e produtividade, eles oferecem alta rigidez mesmo durante operações de usinagem exigentes.

O sistema de controle é responsável por gerenciar todos os movimentos da máquina-ferramenta, como a posição e velocidade da ferramenta de corte e da peça em usinagem. Os sistemas de controle modernos são altamente sofisticados e utilizam tecnologia CNC (Controle Numérico Computadorizado), que permite programar e automatizar as operações de usinagem (Diniz et al., 2014).

O centro de usinagem vertical CNC (Figura 2) oferece ao operador a possibilidade de programar a estratégia de corte da peça desejada em um monitor acoplado à máquina ou conectar a um *softwares* de programação específico onde será gerado o caminho das ferramentas selecionadas para produção: a própria peça.



Figura 2. Centro de Usinagem Vertical Romi



Fonte: <https://www.romi.com/produtos/linha-romi-d-nova-geracao/>

2.3 Ferramentas de Corte

Sendo o fresamento uma técnica de usinagem que utiliza uma ferramenta de corte rotativa para remover material de uma peça, criando um perfil ou cavidade em sua superfície. A escolha da fresa, velocidade de corte e taxa de avanço são cruciais para a qualidade do corte e vida útil da ferramenta (Klocke, 2011). Para atingir metas e ganhar eficiência nas empresas, é importante controlar o desempenho operacional, em máquinas e equipamentos (Schnorrenberger & Nunes, 2019).

A melhoria da usinagem é um desafio arriscado quando o custo e o impacto ambiental devem ser considerados. A vida útil da ferramenta, a reciclagem de materiais, o consumo de energia, a poluição ambiental são fatores diretos e indiretos que aumentam os custos durante vários processos de usinagem (Abdelrazek et al., 2020).

As ferramentas de corte são classificadas de acordo com o tipo de operação que realizam, como torneamento, fresamento, furação, entre outros. Cada tipo de ferramenta é projetado para executar uma operação específica de forma eficiente e precisa e são compostas por diversos elementos, como o substrato, o revestimento, o ângulo de corte, o raio de ponta, a geometria de corte, entre outros (Toenshoff & Denkena, 2013).

As vibrações durante a usinagem são uma parte inevitável do processo, possuem um caráter forçado e sempre acompanham a ação de corte inerente ao processo em que o cavaco é criado. De fato, a vibração de corte é um fator prejudicial que reduz o desempenho e impede melhores estratégias de remoção de material (ISCAR, 2022).

O ângulo de corte é a inclinação da face da ferramenta em relação à linha de avanço. Esse ângulo afeta diretamente o tipo e a força de corte e deve ser ajustado de acordo com o material a ser usinado. O raio de ponta é o arredondamento da aresta de corte da ferramenta. Esse raio reduz a concentração de tensões na aresta de corte e melhora a qualidade da superfície usinada. A geometria de corte é determinada pela forma e posição das faces da ferramenta em relação à peça em usinagem. Essa geometria deve ser escolhida de acordo com as características do material a ser usinado e a operação a ser realizada (Toenshoff & Denkena, 2013).



A prática mais comum é variar os parâmetros de corte entre velocidade e avanço, o que geralmente resulta em redução da produtividade. Portanto, qualquer método eficaz de redução de vibração que não prejudique a produtividade da operação será o diferencial da melhoria contínua (ISCAR, 2022).

A redução do atrito durante os processos de usinagem também pode ser alcançada melhorando as propriedades da ferramenta de corte. Revestir a superfície da ferramenta de corte por "deposição física de vapor" (PVD) ou "deposição química de vapor" (DCV) é uma das técnicas inovadoras, onde a superfície da ferramenta de corte é revestida com uma camada de microespessura composta por um camada dura, antifricção, quimicamente inerte e termicamente isolante (Abdelrazek et al., 2020).

O revestimento é aplicado sobre o substrato para proteger a ferramenta de corte contra o desgaste e a oxidação. Os revestimentos mais comuns são o TiN (nitreto de titânio), o TiCN (carbonitreto de titânio) e o TiAlN (nitreto de titânio e alumínio). O substrato é a base da ferramenta e deve ser resistente e rígido para suportar as altas forças de corte. Os materiais mais utilizados para o substrato são o aço rápido, o carboneto de tungstênio, o cermet e o cerâmico (Toenshoff & Denkena, 2013).

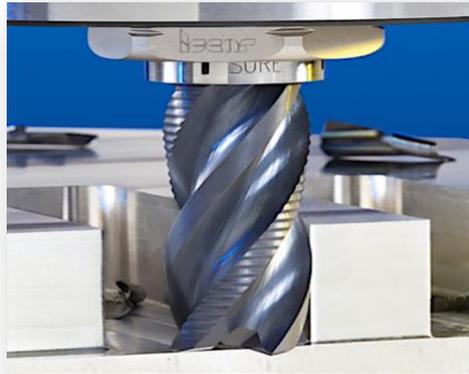
Portanto, as ferramentas de corte são elementos fundamentais na usinagem e devem ser projetadas e selecionadas de acordo com as características do material e da operação a ser realizada. A escolha adequada dos materiais, revestimentos, ângulos de corte, raios de ponta e geometrias de corte é essencial para garantir a qualidade e a eficiência do processo de usinagem (Toenshoff & Denkena, 2013).

Nesse sentido, quando a escolha da geometria da ferramenta é correta à sua aplicação, o corte é suave e estável. A geometria influencia fortemente as oscilações da força de corte, evacuação de cavacos e outros fatores diretamente relacionados aos modos de vibração (ISCAR, 2022).

As ferramentas inteiriças de metal duro têm arestas de corte que separam os cavacos. Um passo de dente habilmente definido é uma maneira eficaz de melhorar significativamente o comportamento dinâmico de uma ferramenta de corte. As fresas de carboneto monolítico ISCAR CHATTERFREE (Figura 3) são projetadas de acordo com o método de controle de passo. A fresa tem diferentes ângulos de passo combinados com diferentes ângulos de hélice. Esse conceito garante um fresamento sem vibrações.



Figura 3. Fresa de topo em metal duro com hélice variada



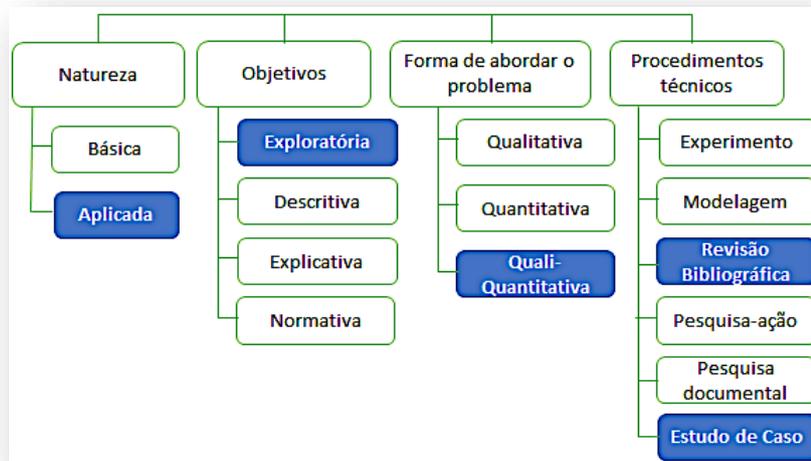
Fonte: <https://www.iscar.com/newarticles.aspx/lang/bz/newarticleid/4205>

As ferramentas de corte são elementos essenciais nos processos de usinagem, pois garantem a eficiência na remoção do material da peça em usinagem, dando forma e acabamento à peça.

3. METODOLOGIA

Para realizar este trabalho, a definição do método, com base em Gil (2002) e Knechtel (2014), é classificada como aplicada, cujos objetivos são exploratórios, com abordagem qualitativa e quantitativa, e os procedimentos técnicos são bibliográficos, realizando uma revisão para apoiar o estudo de caso. A estrutura é descrita no fluxograma da Figura 4.

Figura 4. Fluxograma do método de pesquisa do trabalho



Fonte: Adaptado de (Gil, 2002; Knechtel, 2014)

A natureza aplicada inclui a disponibilidade de conhecimento e a aplicação do conhecimento para benefício econômico e social. Caracteriza-se como exploratório porque proporciona maior familiaridade com o problema, tornando-o mais explícito, levando à construção de hipóteses (Gil, 2002). A abordagem de resolução de problemas é um modelo de pesquisa qualitativo-quantitativo que interpreta informações quantitativas por meio de símbolos numéricos e dados qualitativos por meio de observação, interação participativa e interpretação do discurso dos sujeitos (semântica) (Knechtel, 2014).



Na busca bibliográfica, foi utilizado material já processado constituído principalmente por artigos científicos sobre temas e suas questões relacionadas ao tema deste estudo. Para esta pesquisa foi selecionada a plataforma Google Scholar limitada ao período de 2010 a 2020 e as palavras-chave foram “Melhorias no processo de usinagem” e “Ferramentas de corte”.

Estudos de caso com foco em fenômenos contemporâneos (Yin, 2015) foi o procedimento técnico escolhido neste trabalho. Nos estudos de caso, é necessário fazer observações e coletar dados, que normalmente são analisados por esse método. Uma abordagem desse procedimento técnico é avaliar a aplicação prática da pesquisa bibliográfica descrita acima, para a qual a pesquisa exploratória é realizada em cinco etapas:

- Definição da empresa com a ocorrência do experimento no passado;
- Identificação de problemas decorrentes do processo produtivo;
- Análise dos tempos gerados durante a usinagem;
- Pesquisa e coleta de dados sobre as estratégias utilizadas;
- Avaliação detalhada dos dados recolhidos e análise das suas conclusões sobre o objeto desse trabalho.

Foi realizada pesquisa exploratória e observação detalhada de uma empresa denominada Alfa. Essas permitiram algumas conclusões sobre o objeto deste trabalho. Vale ressaltar que essa empresa atua há 16 anos na prestação de serviços de usinagem para diversos setores: automotivo, aeroportuário, agrícola, etc.

O objeto deste estudo de caso, uma pequena empresa que possui um centro de usinagem CNC da fabricante Romi modelo D800 em seu processo de usinagem, e usina diversos tipos de peças. Foi selecionado um modelo de peça denominada Catraca, que é fornecida em estado bruto fabricada pelo processo de fundição em Ferro Fundido Cinzento (Figura 5).

Figura 5. Catraca estado bruto fundida



Fonte: Autores (2023)



A peça é usinada inicialmente pelo processo de torneamento e posteriormente é fixada pelo centro apoiada direto na mesa (Figura 6), para ser usinado os dentes pelo processo de fresamento. A empresa não autorizou a reprodução do desenho técnico pelo fato das informações confidenciais contidas nele.

Figura 6. Catraca fixada na mesa do centro de usinagem



Fonte: Autores (2023)

Foi verificado no processo atual, a utilização de uma fresa topo reto, metal duro, $\varnothing 10\text{mm}$, 4 cortes, com cobertura do fornecedor 1, conforme Figura 7.

Figura 7. Características da ferramenta de corte

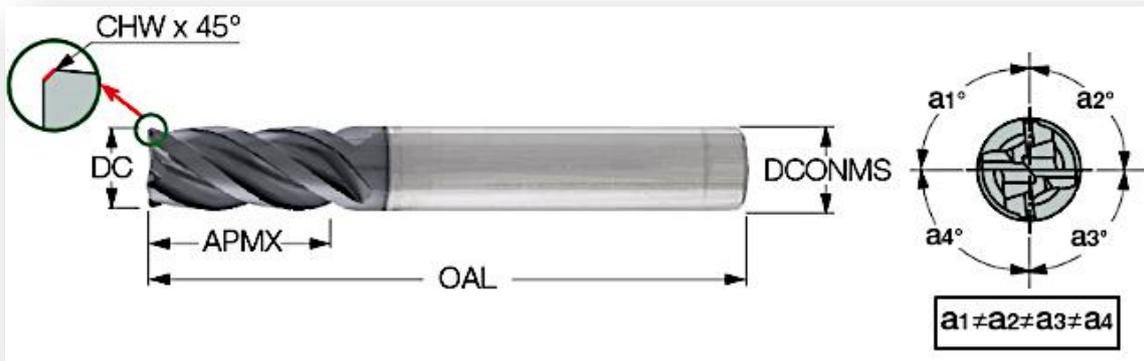


Fonte: Autores (2023)

O fornecedor 2 apresentou para teste, a proposta da ferramenta EC-E4L 10-31/34C10CF72908, uma fresa de topo de 4 canais, com diferentes ângulos de hélice, passo variável com altas taxas de remoção de material, evacuação eficiente de cavacos, para operações de desbaste e acabamento com a proposta de melhorar o desempenho da usinagem (Figura 8).



Figura 8. Características da ferramenta EC-E4L 10-31/34C10CF72908



Fonte: <https://www.iscar.com/eCatalog/Family.aspx?fnum=3736&mapp=ML&app=0&GFSTYP=M>

A estratégia de usinagem utilizada foi de contorno com Z constante (sem retração) e os parâmetros da usinagem foram ajustados conforme as orientações dos fornecedores 1 e 2 apresentadas na Figura 9.

Figura 9. Parâmetros de usinagem conforme orientação dos fornecedores

		Fornecedor 1	Fornecedor 2
Rotação (n)	rot./min.	6000	6000
Diâmetro da Ferramenta	mm	10	10
Número de dentes (z)	qtd	4	4
Velocidade de Corte (Vc)	m/min.	188	188
Avanço por faca (fz)	mm/dente	0,0667	0,05
Avanço por rotação (f)	mm/rot.	0,2668	0,2
Avanço da mesa (Vf)	mm/min.	1601	1200
Comprimento usinado (l)	mm		
Profundidade de Corte (ap)	mm	0,5	4
Largura de Corte (ae)	mm	10	10
Potência Consumida	Kw		

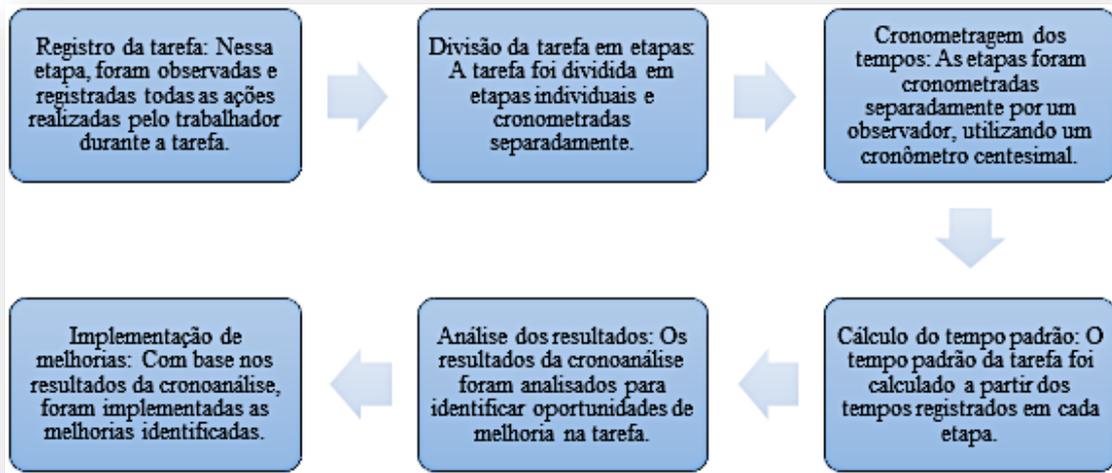
Fonte: Autores (2023)

Para o estudo de caso foi aplicada a cronoanálise, que segundo Barnes (1968), é um método utilizado para determinar o tempo padrão de execução de uma operação na usinagem. Ele é baseado na observação e análise do tempo gasto por um operador habilidoso para realizar uma determinada operação.

O autor define a cronoanálise como "o processo de registrar, medir e analisar o tempo necessário para realizar uma tarefa ou operação específica, com a finalidade de estabelecer um padrão de tempo e identificar oportunidades de melhoria na eficiência e redução de custos na produção". Em resumo, o autor descreve cada um dos processos da cronoanálise como um conjunto de etapas, conforme fluxograma representado na Figura 10.



Figura 10. Fluxograma da cronoanálise



Fonte: Adaptado de (Barnes, 1968)

Cada etapa foi fundamental para o sucesso da cronoanálise e para a identificação de oportunidades de melhoria na eficiência e redução de custos na produção.

4. Análise dos Resultados

Em estudos acadêmicos anteriores sobre processos de usinagem no setor metalomecânico, inferiu-se que a combinação de diferentes tipos de ferramentas de corte oferece parâmetros e estratégias que permitem melhorar o desempenho da usinagem em termos de tempo e custo.

Na cronoanálise, o resultado do tempo padrão calculado com base nos tempos registrados na etapa de usinagem da peça, com o uso da ferramenta do Fornecedor 1, foi de 26,67 horas centesimais, e do Fornecedor 2, foi de 5,02 horas centesimais. Portanto, a comparação entre as duas ferramentas mostrou um aumento na produtividade de 3,75 peças/hora para 19,91 peças/hora conforme mostra a Figura 11, corroborando com os achados na literatura.

Figura 11. Comparativo de produtividade entre as ferramentas

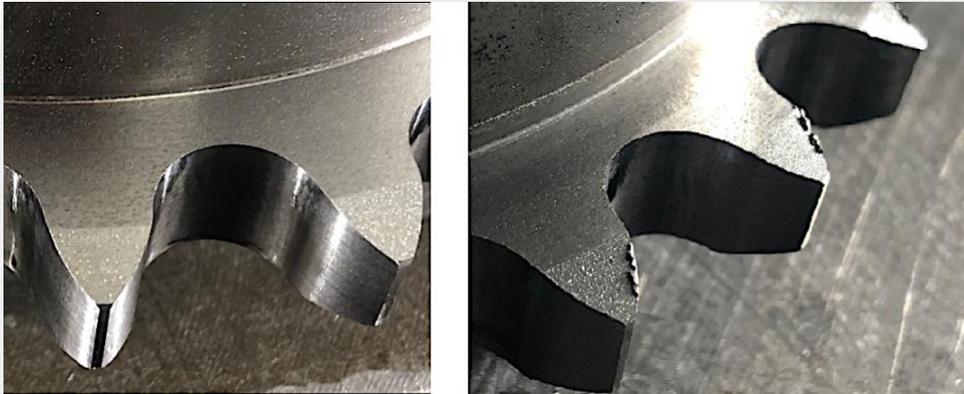
Critério para Troca	Fornecedor 1		Fornecedor 2	
		DESGASTE		DESGASTE
(1) Peças produzidas Jg. Arestas / Afição		50		70
(2) Tempo efetivo de corte	min./peça	15,000		2,000
(3) Tempo restante do ciclo usinagem	min./peça			
(4) Tempo de troca da aresta/ferram.	min.	1,000		1,000
(5) Tempo de troca	min./peça	0,020		0,014
(6) Tempo improdutivo	min./peça	1,000		1,000
(7) Tempo do Ciclo de usinagem (2)+(3)	min./peça	15,000		2,000
(8) Tempo total da operação (5)+(6)+(7)	min./peça	16,020		3,014
Produção 60/(8)	peças/hora	3,75		19,91

Fonte: Autores (2023)



Os critérios de avaliação da vida útil da ferramenta no teste visual aplicado foram verificados a partir do desgaste das rebarbas geradas da aresta nos componentes e das alterações dimensionais detectadas após o processo de usinagem (Figura 12).

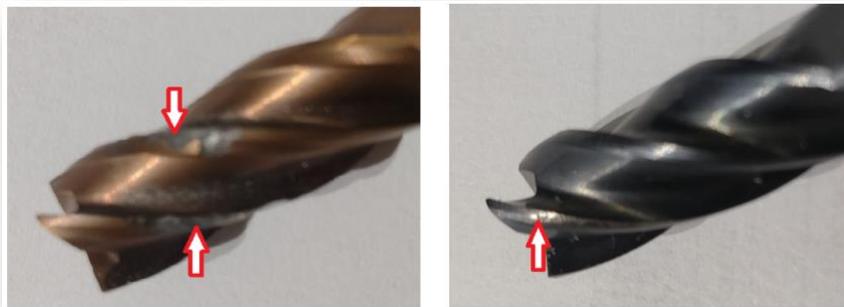
Figura 12. Comparação visual das arestas dos dentes usinados
Peça usinada sem rebarbas Peças usinadas com rebarbas



Fonte: Autores (2023)

A ferramenta do Fornecedor 1 suportou a usinagem de 50 peças antes da manifestação das rebarbas, enquanto a ferramenta do Fornecedor 2 permitiu a usinagem de 70 peças durante os testes antes de surgirem as rebarbas. Na Figura 13 é possível comparar os desgastes presentes nas arestas de corte das fresas após seu uso.

Figura 13. Comparação visual do desgaste das arestas das fresas
Fresa Fornecedor 1 Fresa Fornecedor 2



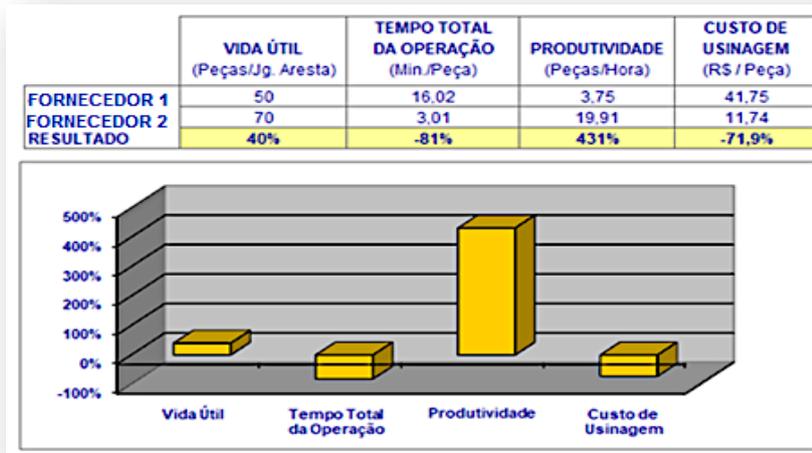
Fonte: Autores (2023)

Pôde-se verificar no comparativo das melhorias do processo de usinagem, conforme mostra a Figura 14, que a proposta do Fornecedor 2 gerou fatores significativos para aprovação imediata após a realização do teste, pois foram encontrados os seguintes dados:

- Aumento da vida útil da ferramenta em 40%;
- Redução do tempo total de operação em 81%;
- Produtividade elevada em 431%;
- Redução no custo por peça relacionando o investimento da ferramenta com a quantidade de peças produzidas.



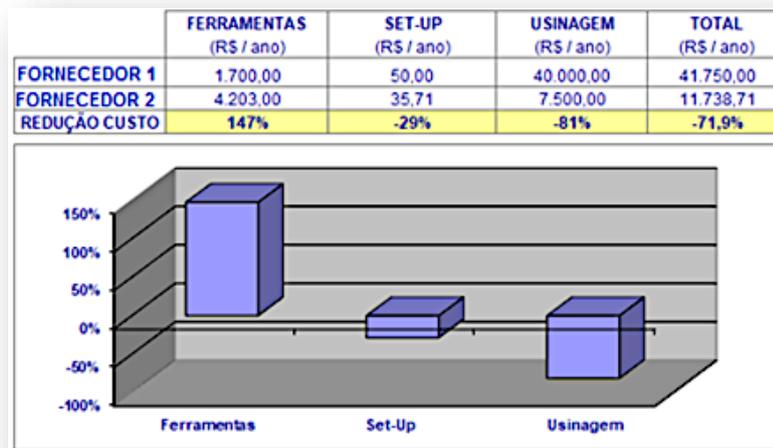
Figura 14. Comparativo das melhorias no processo de usinagem



Fonte: Autores (2023)

Na Figura 15, comparando os dois cenários, pode-se observar que o aumento da produtividade teve um impacto financeiro positivo e reduziu o custo de investimento em ferramentas. Na proposta do fornecedor 2, observa-se que o custo da ferramenta é 3,5 vezes maior que a ferramenta atual do fornecedor 1, mas devido ao seu desempenho, proporcionou melhorias significativas no processo e maior vida útil, o que contribuiu para a redução do consumo de ferramentas no processo, transformando-se em economia.

Figura 15. Comparativo dos custos do processo de usinagem



Fonte: Autores (2023)

Por fim, outros custos envolvidos no processo de usinagem como (energia, óleo lubrificante, disponibilidade da máquina, pessoal, *setup* de troca de ferramentas etc.) também foram reduzidos, gerando:

- Redução de 29% com setup
- Redução de 81% no custo de usinagem;
- Economia de R\$ 30.011,29/ano (72%).



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo de caso, foi avaliada a possibilidade de melhoria no processo de usinagem de uma peça denominada Catraca, usando diferentes ferramentas de corte. Os resultados mostraram que a ferramenta fornecida pelo Fornecedor 2 apresentou um desempenho superior em relação à ferramenta do Fornecedor 1, resultando em melhorias significativas no processo de usinagem.

Por meio deste estudo, inferiu-se que a combinação de diferentes tipos de ferramentas de corte no processo de fresamento de dentes de engrenagens permitiu melhorar o desempenho da usinagem em termos de tempo e custo, de acordo com estudos anteriores no setor metalomecânico.

Os resultados obtidos comprovaram que, a implementação da proposta do Fornecedor 2 gerou melhorias significativas no processo de usinagem. Houve um aumento da vida útil da ferramenta, uma redução no tempo total de operação, um aumento da produtividade e uma redução no custo por peça relacionando o investimento da ferramenta com a quantidade de peças produzidas, além de economia indireta em outros custos envolvidos no processo de usinagem como energia, óleo lubrificante, disponibilidade da máquina, pessoal e *setup* de troca de ferramentas

Algumas limitações devem ser consideradas neste estudo, como a falta de análise de outras variáveis que possam afetar o processo de usinagem e a possibilidade de que outros tipos de ferramentas possam ter um desempenho ainda melhor do que as testadas neste estudo.

Os métodos utilizados neste estudo foram adequados para o objetivo proposto, com ajuste dos parâmetros de usinagem e avaliação da vida útil das ferramentas com base no desgaste das rebarbas geradas e nas alterações dimensionais detectadas.

Considerando todos esses pontos analisados e sua relevância, foi sugerido que a empresa implementasse treinamento entre fornecedores e colaboradores sobre tipos de ferramentas de corte e suas aplicações.

Para estudos futuros, sugere-se a análise de outras variáveis que possam afetar o processo de usinagem, como a geometria da peça e a composição do material utilizado. Além disso, sugere-se a análise de outras ferramentas de corte e a avaliação de seu desempenho em diferentes tipos de usinagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdelrazek, A. H., Choudhury, I. A., Nukman, Y., & Kazi, S. N. (2020). Metal cutting lubricants and cutting tools: A review on the performance improvement and sustainability assessment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(9), 4221-4245. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04890-w>

Barnes, R. M. (1968). *Motion and Time Study: Design and Measurement of Work*. Wiley.

Costa, A. M., Mattos, A. K. de M., Rodrigues, N. M., & Barboza, D. V. (2019). Aplicando a Modelagem de

Processos de Negócio em uma Retificadora de Motores em Cabo Frio-RJ. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 5(2), 130-142.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C., & Coppini, N. L. (2014). *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. 8.

El-Hofy, H. (2018). *Conventional and Nonconventional Processes*, Third Edition (3^{ed}). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429443329>

Ferraresi, D. (2018). *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. Editora Blucher.



Citação (APA): Feriotti, M. A., Lima, E. F., Neto., Formigoni, A., & Martino, J., Neto. (2023). Melhoria do processo de fresamento de dentes de engrenagem: estudo de caso em uma pequena empresa. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 9(2), 127-142.

Gil, A. C. (2002). *Como elaborar projetos de pesquisa* (Vol. 4). Atlas São Paulo.

ISCAR. (2022). <https://www.iscar.com/newarticles.aspx/lang/bz/newarticleid/4205>

Klocke, F. (2011). *Manufacturing Processes 1: Cutting*. Springer Science & Business Media.

Knechtel, M. do R. (2014). *Metodologia da pesquisa em educação: Uma abordagem teórico-prática dialogada*. Curitiba: Intersaberes.

Lafin, P. (2018). *Estudo comparativo de ferramentas do tipo alisadora e convencional no torneamento do aço* *AISI* 1045.

<https://repositorio.ifsc.edu.br/handle/123456789/250>

Machado, Á. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Silva, M. B. da, & Ruffino, R. T. (2009). *Teoria da usinagem dos materiais*.

<https://repositorio.usp.br/item/002126508>

Schnorrenberger, J. G. A., & Nunes, F. D. L. (2019). Eficiência de Equipamentos: Aplicação de uma Ferramenta para Medir o Desempenho de Equipamentos em uma Empresa Metalmeccânica de Pequeno Porte no Sul do Brasil. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 5(6), 86-107.

Silva, M. M., da. (2019). *Melhoria do processo de usinagem em torno CNC com o auxílio do sistema Lean Manufacturing*.

<https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/handle/123456789/6040>

Stoeterau, R. L. (2004). *Introdução ao projeto de máquina-ferramentas modernas*. Universidade Federal de Santa Catarina, 28.

Toenshoff, H. K., & Denkena, B. (2013). *Basics of Cutting and Abrasive Processes*. Springer Science & Business Media.

Yin, R. K. (2015). *Planejamento e métodos* (5º ed). Bookman Editora.

