

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Daniel Dias Barbosa

**ANÁLISE DO IMPACTO DO PERÍODO DE
PLANEJAMENTO EM PROCESSOS DE
USINAGEM DE PLACAS PLANAS COM
ALGORITMO DE EMPACOTAMENTO**

Uberlândia, Brasil

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Daniel Dias Barbosa

**ANÁLISE DO IMPACTO DO PERÍODO DE
PLANEJAMENTO EM PROCESSOS DE USINAGEM
DE PLACAS PLANAS COM ALGORITMO DE
EMPACOTAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Computação da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção título de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Marcelo Nascimento Zanchetta

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Faculdade de Computação

Bacharelado em Ciência da Computação

Uberlândia, Brasil

2025

Daniel Dias Barbosa

**ANÁLISE DO IMPACTO DO PERÍODO DE
PLANEJAMENTO EM PROCESSOS DE USINAGEM
DE PLACAS PLANAS COM ALGORITMO DE
EMPACOTAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Faculdade de Computação da Universidade
Federal de Uberlândia, como parte dos requi-
sitos exigidos para a obtenção título de Ba-
charel em Ciência da Computação.

Trabalho aprovado. Uberlândia, Brasil, 24 de abril de 2025:

Marcelo Nascimento Zanchetta
Orientador

Ivan da Silva Sendin

Leandro Nogueira Couto

Uberlândia, Brasil

2025

Resumo

Este estudo aborda o desafio de otimizar o uso de matéria-prima no processo de usinagem em linhas de produção, focando na organização das peças sobre placas de material. O problema é intensificado pela diversidade de geometrias das peças e pelas restrições operacionais das máquinas, como a exigência de placas retangulares com área mínima. A pesquisa utiliza a biblioteca Python `pynest2d`, uma ferramenta baseada em otimização combinatória e heurísticas, que busca arranjar as peças de forma a maximizar o aproveitamento do material e minimizar desperdícios. Embora o `pynest2d` proporcione melhorias significativas na alocação das peças, o estudo destaca que o consumo de matéria-prima ainda é elevado, refletindo a necessidade de um planejamento estratégico adequado. Em cenários com ordens de produção distribuídas ao longo de vários dias, o agrupamento de mais ordens por empacotamento de usinagem resulta em menores desperdícios, uma vez que o algoritmo consegue aproveitar melhor o espaço disponível. A pesquisa mostra que a gestão integrada das ordens e o planejamento de longo prazo são fundamentais para reduzir os custos operacionais e melhorar a sustentabilidade do processo de usinagem. Dos principais resultados foi observado que, ao considerar o agrupamento de mais peças por empacotamento, o `pynest2d` reduz os desperdícios em até 14,78% e melhora o aproveitamento da matéria-prima, com uma economia substancial em comparação a cenários sem planejamento.

Palavras-chave: Usinagem, otimização, placas planas, simulação.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo de um processo de usinagem no torneamento (Adaptado de (MACHADO et al., 2015)).	12
Figura 2 – Movimentos Ativos de usinagem no processo de torneamento (Adaptado de (MACHADO et al., 2015)).	14
Figura 3 – Sistema de coordenadas planas para CNC (Fonte: (DIO, 2018)).	17
Figura 4 – Exemplo de organização das peças em uma placa plana.	24
Figura 5 – Fluxo das etapas de todo o processo.	25
Figura 6 – Pseudocódigo do problema.	27
Figura 7 – Percentual de diferença de redução dos retalhos por dia	31
Figura 8 – Diferença percentual ao longo dos dias de planejamento	33

Lista de tabelas

Tabela 1 – Detalhamento do processo de usinagem em percentual.	28
Tabela 2 – Detalhamento do processo de usinagem em valores absolutos.	28
Tabela 3 – Descrição tabular dos retalhos usinados	29
Tabela 4 – Informações sobre o consumo de matéria prima	32

Lista de abreviaturas e siglas

CAD	Computer-Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CBN	Nitreto de Boro Cúbico
PCD	Diamante Policristalino
HSS	Aço Rápido
MIT	Massachusetts Institute of Technology
DNC	Controle Numérico Direto

Sumário

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Objetivo	9
1.2	Organização do trabalho	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1	Teoria da Usinagem	11
2.2	Parâmetros de corte na Usinagem	13
2.3	Máquinas CNC	15
2.4	Linguagem G	16
2.5	Características de um CNC	18
2.6	<i>Computer-Aided Design / Computer-Aided Manufacturing</i>	19
2.7	Vida de Ferramenta	20
2.8	Empacotamento	22
2.9	Pynest	22
2.10	Considerações Finais	23
3	METODOLOGIA	24
3.1	Fluxo das Etapas	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
4.1	Detalhamento do Processo de Usinagem	28
4.2	Análise da Quantidade de Retalhos Gerados	29
4.3	Análise do Consumo de Matéria Prima	32
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	34
5.1	Conclusões	34
5.2	Sugestões de Trabalhos Futuros	34
	REFERÊNCIAS	35

1 Introdução

A usinagem é uma etapa fundamental na indústria de manufatura, reconhecida por sua capacidade de produzir peças com elevada precisão dimensional e excelente qualidade superficial. Este processo é amplamente utilizado na fabricação de componentes essenciais para setores como aeroespacial, automotivo e médico, onde tolerâncias rigorosas e materiais de alta performance são requisitos indispensáveis (KALADHAR; SUBBAIAH; RAO, 2012). No entanto, a usinagem apresenta desafios significativos, especialmente quando se trabalha com materiais avançados como ligas de níquel, Inconel e compósitos de fibra de carbono (FERNANDES et al., 2024). Estes materiais, conhecidos por sua alta resistência térmica, mecânica e à corrosão, são essenciais para aplicações críticas, mas também são notoriamente caros e difíceis de usinar, o que reforça a necessidade de estratégias otimizadas para minimizar desperdícios e reduzir custos.

Além dos desafios relacionados aos materiais, o aproveitamento eficiente da matéria-prima é outra questão central no processo de usinagem. Em particular, a disposição de peças em placas de matéria-prima deve considerar uma série de restrições, como a necessidade de garantir áreas mínimas para fixação por vácuo em máquinas de Controle Numérico Computadorizado (CNC) e a geometria retangular das placas (HAMDAN; SARHAN; HAMDI, 2012). A geração de retalhos inutilizáveis, frequentemente associada a uma má organização das ordens de produção, representa não apenas uma perda econômica significativa, mas também um impacto ambiental indesejável. A crescente demanda por sustentabilidade na indústria de manufatura também reforça a necessidade de otimizar o uso da matéria-prima. O desperdício excessivo não apenas eleva os custos de produção, mas também contribui para o consumo desnecessário de recursos naturais e a geração de resíduos industriais. Diante desse cenário, estratégias que minimizem as perdas de material e promovam um uso mais racional dos insumos tornam-se cada vez mais relevantes, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental.

Além disso, a gestão das ordens de produção influencia diretamente o nível de desperdício gerado no processo de usinagem. Em muitas indústrias, as ordens de produção chegam de maneira distribuída ao longo dos dias, o que pode dificultar a organização do aproveitamento do material. Quando cada ordem é processada individualmente, sem um planejamento que considere a possibilidade de agrupamento de peças, há maior propensão à geração de retalhos de formatos não reutilizáveis, reduzindo a eficiência do processo. Dessa forma, torna-se essencial investigar métodos que permitam não apenas uma melhor alocação das peças nas placas de matéria-prima, mas também um planejamento estratégico da produção que maximize a eficiência no consumo de materiais. O uso de técnicas computacionais e algoritmos de otimização surge como uma alternativa promissora para

enfrentar esses desafios, possibilitando uma abordagem mais sistemática e eficiente na gestão do processo de usinagem.

Neste trabalho, foi realizado um estudo utilizando uma ferramenta computacional para otimizar o aproveitamento da matéria-prima no processo de usinagem, visando reduzir desperdícios e aumentar a eficiência produtiva. Para isso, utilizou-se a biblioteca `pynest2d`, que emprega algoritmos de otimização combinatória e heurísticas para organizar a disposição das peças nas placas de matéria-prima. Os métodos adotados incluíram a modelagem do problema como um caso de corte e empacotamento bidimensional, a implementação de simulações computacionais para avaliar diferentes estratégias de agrupamento de ordens de produção e a análise comparativa dos resultados obtidos. Além disso, foram consideradas restrições operacionais da usinagem, como a necessidade de áreas mínimas para fixação das peças e a geometria das placas utilizadas. A metodologia proposta permitiu quantificar os ganhos obtidos com um planejamento mais estratégico da produção, demonstrando que a combinação entre otimização computacional e gestão das ordens pode gerar economias substanciais de material e reduzir impactos ambientais no setor de manufatura.

1.1 Objetivo

Este trabalho teve como objetivo analisar o impacto do período de planejamento na otimização do consumo de matéria-prima em processos de usinagem de placas planas, utilizando algoritmos de empacotamento. O foco principal foi avaliar como a ampliação do horizonte de planejamento pode reduzir desperdícios e melhorar a eficiência produtiva.

Pontualmente, os objetivos específicos deste trabalho foram:

- Investigar o uso da biblioteca `pynest2d` para otimização de empacotamento de peças em placas de matéria-prima;
- Avaliar a influência do planejamento de ordens de produção na redução de retalhos gerados durante a usinagem;
- Analisar o impacto do aumento do horizonte de planejamento na eficiência do consumo de matéria-prima;
- Comparar diferentes cenários de planejamento e quantificar as economias obtidas em termos de material e custos operacionais.

1.2 Organização do trabalho

Neste capítulo, foi apresentada uma introdução sobre o tema abordado, as considerações iniciais, motivação e objetivos do desenvolvimento deste trabalho. O restante deste trabalho possui a seguinte organização:

- **Capítulo 2:** Apresenta a contextualização que aborda os conceitos fundamentais sobre usinagem ([KALADHAR; SUBBAIAH; RAO, 2012](#)), algoritmos de empacotamento e técnicas de otimização aplicadas ao aproveitamento de matéria-prima ([HAMDAN; SARHAN; HAMDI, 2012](#));
- **Capítulo 3:** Descreve a metodologia adotada, incluindo o fluxo de etapas, a modelagem do problema e o uso da biblioteca `pynest2d` para a otimização do empacotamento das peças nas placas de matéria-prima;
- **Capítulo 4:** Apresenta os resultados obtidos e a análise do impacto do período de planejamento na eficiência do consumo de matéria-prima, incluindo comparações entre diferentes cenários;
- **Capítulo 5:** Contém as conclusões do estudo, discutindo os principais achados e sugerindo trabalhos futuros que possam aprimorar a abordagem proposta;
- **Capítulo 6:** Reúne as referências bibliográficas utilizadas ao longo do trabalho, fundamentando a pesquisa com base em estudos relevantes na área de usinagem, otimização e algoritmos de empacotamento.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, será apresentada uma revisão bibliográfica que abrange os principais aspectos teóricos, conceitos essenciais, temas relevantes e elementos necessários para o desenvolvimento deste trabalho. Será explorado o processo de usinagem, abordando fatores como vida útil da ferramenta, CNC, atrito, desgaste e os conceitos de Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing (CAD/CAM). Esses conceitos fornecerão a base necessária para a compreensão da metodologia e dos resultados apresentados nos capítulos subsequentes, permitindo uma análise mais profunda das práticas e inovações no campo da usinagem.

2.1 Teoria da Usinagem

A usinagem é um processo de manufatura utilizado para transformar materiais brutos em peças de precisão com formatos e dimensões específicas. Ela envolve o uso de ferramentas de corte que removem camadas do material da peça original, conhecido como cavaco, de modo a deixar a peça com a forma e as características desejadas. Esse processo é extremamente versátil, sendo aplicado em uma ampla variedade de materiais, como metais e plásticos, e é essencial em indústrias como automotiva, aeroespacial, metalúrgica e de equipamentos médicos ([MACHADO et al., 2015](#)).

O conceito de cavaco é fundamental na usinagem, pois representa o excesso de material retirado pela ferramenta durante o processo, com geometria irregular e variável, dependendo do tipo de material e da operação executada. A remoção controlada desse material permite que a peça atinja suas especificações, tanto em termos de forma quanto de acabamento superficial. A precisão dimensional alcançada é uma das maiores vantagens da usinagem, tornando-a adequada para peças que exigem baixas tolerâncias e superfícies lisas.

De acordo com os autores em ([DEBNATH; REDDY; YI, 2014](#)), existem vários processos de usinagem como torneamento, fresamento e furação. Dentre os processos de corte, o mais comum é o torneamento. Nele, uma ferramenta cortante é aplicada contra uma peça em rotação para remover material em torno de seu eixo.

Na Figura 1 é apresentado um exemplo do processo de torneamento e os principais movimentos envolvidos neste processo. Nela observa-se o movimento de avanço, que ocorre quando a ferramenta se desloca paralelamente à peça, determinando a profundidade do corte, e o movimento de corte, que se refere à ação principal da ferramenta, responsável por remover o material da peça para obter a forma desejada.

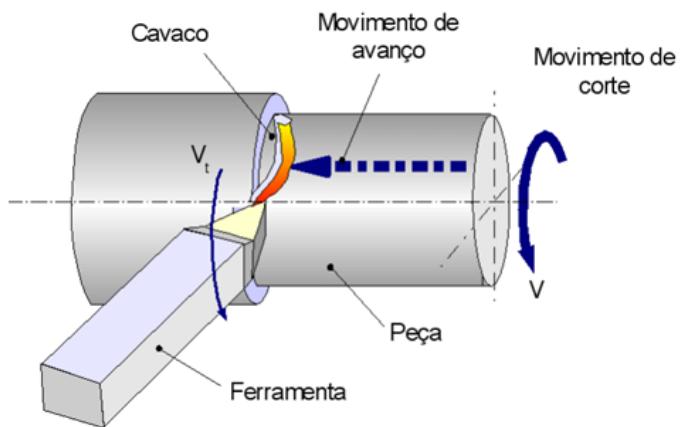


Figura 1 – Exemplo de um processo de usinagem no torneamento (Adaptado de ([MACHADO et al., 2015](#))).

Outros processos, como o fresamento, utilizam uma ferramenta rotativa que corta em diferentes eixos para gerar superfícies mais complexas. A seleção dos parâmetros de corte, como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, é utilizada para otimizar o desempenho e a vida útil das ferramentas, além de garantir a qualidade final da peça. A velocidade de corte inadequada pode levar ao desgaste prematuro da ferramenta, enquanto avanços muito altos podem gerar cavacos maiores e comprometer a precisão do acabamento ([FERNANDES et al., 2023](#)). Com o avanço da tecnologia, a usinagem também evoluiu significativamente. Hoje em dia, as máquinas de comando numérico computadorizado automatizaram muitas das operações que antes eram feitas manualmente, permitindo maior controle e precisão em peças complexas. Além disso, a Indústria 4.0 está integrando sistemas inteligentes que utilizam dados em tempo real para monitorar e ajustar processos de usinagem, aumentando a eficiência e reduzindo desperdícios. O estudo da usinagem também abrange a vida útil das ferramentas, que é diretamente afetada pelo material da ferramenta, pelos parâmetros de corte e pelas condições de resfriamento. O uso de fluidos de corte adequados, por exemplo, pode reduzir o atrito e a temperatura no ponto de corte, aumentando a durabilidade da ferramenta e melhorando a qualidade do acabamento superficial. Em suma, a usinagem é um processo essencial para a manufatura moderna, integrando precisão, versatilidade e inovação tecnológica para atender às exigências de diversos setores industriais. Isso pode ser como processo principal de fabricação ou para acabamento de peças, sua tarefa é fundamental para garantir produtos de alta qualidade e confiabilidade ([FITZPATRICK, 2013](#)).

2.2 Parâmetros de corte na Usinagem

Compreender os parâmetros de corte na usinagem é fundamental, pois a escolha adequada desses fatores físicos que governam o processo pode influenciar significativamente a qualidade do processo. Dentre esses parâmetros, o movimento de usinagem é essencial, pois está relacionado ao deslocamento entre a ferramenta de corte e a peça de trabalho. Esse movimento é subdividido em dois tipos principais: os movimentos ativos, que resultam diretamente na remoção de material da peça, e os movimentos passivos, que não removem material, mas desempenham papéis de apoio e ajuste durante o processo. A norma ([Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1989](#)) regulamenta formalmente esses movimentos e estabelece diretrizes para a correta execução dos processos de usinagem.

- **Movimento de Avanço** – Refere-se ao deslocamento entre a peça e a aresta de corte, que junto ao movimento de corte, resulta na remoção contínua de material em forma de cavaco;
- **Movimento de Corte** – Esse movimento ocorre entre a peça e a aresta de corte, e sem a presença do movimento de avanço, ele provoca a remoção única de cavaco em um curso ou rotação;
- **Movimento Efetivo** – É o movimento combinado, em que tanto o corte quanto o avanço acontecem simultaneamente, possibilitando a remoção eficiente de material;
- **Movimento de Ajuste** – Trata-se do movimento utilizado para definir a espessura da camada de material que será removida, “zerando” a distância entre a ferramenta e a peça;
- **Movimento de Aproximação** – Neste movimento, a ferramenta é levada até próximo da peça, preparando-se para iniciar a operação de usinagem;
- **Movimento de Correção** – Esse movimento ajusta a posição da ferramenta para compensar o desgaste que ocorre durante o processo, garantindo a precisão na usinagem;
- **Movimento de Recuo** – Após o término da usinagem, este movimento retira a ferramenta da proximidade da peça, finalizando o processo.

Conforme indicado na Figura 2, os movimentos de avanço, corte e efetivo são os movimentos ativos, pois estão diretamente relacionados à remoção de material durante o processo de usinagem. O movimento de corte é responsável pelo deslocamento da ferramenta para cortar o material, o movimento de avanço determina a progressão da ferramenta ao longo da peça, e o movimento efetivo é a combinação desses dois, resultando no formato final da peça. Por outro lado, os movimentos passivos, como o de posicionamento

ou retorno, não contribuem diretamente para a remoção de material, mas são essenciais para preparar ou finalizar o processo de usinagem.

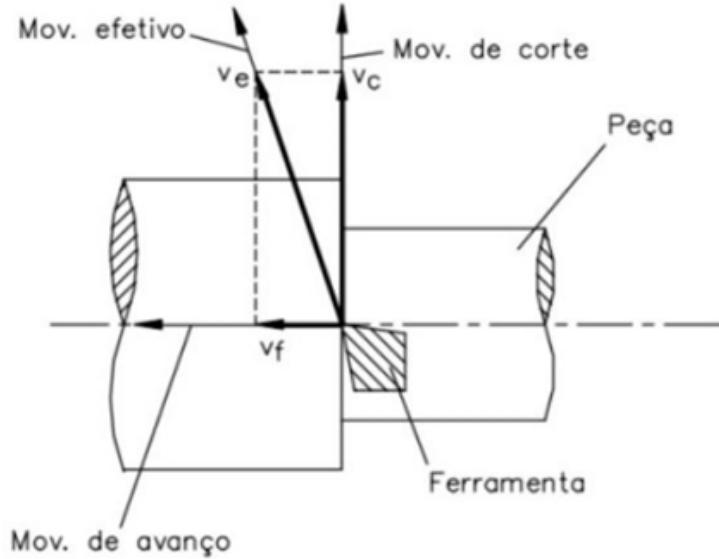


Figura 2 – Movimentos Ativos de usinagem no processo de torneamento (Adaptado de (MACHADO et al., 2015)).

Além dos movimentos de usinagem, é fundamental considerar algumas das grandezas que influenciam o processo. Na usinagem, existem três parâmetros que devem ser definidos ao operar um torno mecânico, sendo a velocidade de avanço (V_f), a velocidade de corte (V_c) e a profundidade de corte (a_p):

- **Velocidade de avanço (V_f):** Refere-se à taxa com que a ferramenta se move em relação à peça de trabalho, sendo um fator determinante na eficiência da remoção de material e na qualidade do acabamento superficial;
- **Velocidade de corte (V_c):** É a velocidade na qual a aresta de corte da ferramenta interage com a superfície do material a ser usinado, influenciando diretamente a taxa de produção e o desgaste da ferramenta;
- **Profundidade de corte (a_p):** É a espessura do material que é removida em cada passagem da ferramenta, impactando tanto o tempo de usinagem quanto a integridade estrutural da peça.

É importante destacar que, dependendo do tipo de processo de usinagem, podem existir outros parâmetros adicionais a serem considerados, como no fresamento, na retificação ou no brochamento, que contêm outros parâmetros não presentes no torneamento. Por exemplo, no fresamento, alguns parâmetros adicionais a serem considerados são:

- **Avanço por dente (F_z):** Refere-se ao deslocamento de avanço por dente, correspondente à distância entre duas superfícies em usinagem consecutivas, sendo medido na direção do avanço;
- **Avanço de corte (F_c):** Distância entre superfícies consecutivas, medida no plano de trabalho e perpendicular à direção de corte;
- **Penetração de avanço (F_f):** Refere-se à profundidade de avanço medida a partir da penetração da ferramenta no plano de trabalho e na direção do avanço;
- **Penetração de trabalho (a_e):** Indica a penetração da ferramenta na peça, medida no plano de trabalho e na direção perpendicular à direção do plano de avanço.

2.3 Máquinas CNC

O Controle Numérico (CN) foi introduzido em 1952 no Massachusetts Institute of Technology (MIT), como parte de um esforço para modernizar uma fresadora vertical. Através de um processo chamado *retrofitting*, que consiste em adaptar máquinas antigas com novas tecnologias, foram adicionados servomotores à fresadora, permitindo o processamento de peças de alumínio. A principal característica do CN é o controle automatizado da máquina, baseado em comandos codificados em números e letras, que instruem a ferramenta a se mover conforme o planejado. Com o avanço dessa tecnologia, o CNC passou a dominar o setor, substituindo o controle manual por software, o que aumentou a precisão e a eficiência no processo de usinagem.

O estudo proposto em Fitzpatrick (FITZPATRICK, 2013) destaca que essa evolução foi essencial para a automação industrial, e os pesquisadores (SILVA; FILHO, 2022) ressaltam a divisão entre o Controle Numérico Direto (DNC), no qual um computador central comanda várias máquinas, e o CNC, onde cada máquina tem seu próprio processador. Com essa diversificação, surgiu a possibilidade de programação remota através de softwares como CAD/CAM, permitindo uma integração mais fluida entre o design e a produção.

O CNC se tornou fundamental em diversos setores industriais, desde a fabricação de peças para automóveis até o setor aeroespacial. Ao automatizar as operações, o CNC tornou os processos mais ágeis e precisos, minimizando a necessidade de intervenção humana e reduzindo significativamente os erros. A capacidade de programar máquinas para realizar operações específicas sem supervisão constante trouxe um aumento notável na produtividade e na qualidade dos produtos.

Outro ponto relevante é a contribuição da tecnologia CNC para a segurança no ambiente de trabalho, já que a automação de tarefas perigosas diminui o risco de acidentes.

As máquinas CNC modernas também incluem dispositivos de segurança integrados para proteger os operadores, conforme apontado por (JUNIOR; FREITAS, 2022).

O uso da linguagem-G, uma linguagem de programação universal utilizada em máquinas CNC, foi crucial para o funcionamento dessa tecnologia. A linguagem-G define parâmetros como posição, velocidade e profundidade de corte das ferramentas, garantindo a execução precisa das operações de usinagem. A capacidade de programar e testar as instruções antes de iniciar a produção economiza recursos valiosos, como tempo e material. A evolução dessa linguagem ao longo dos anos, com novos comandos e funcionalidades, permitiu maior flexibilidade e controle na produção.

Para operar com eficiência uma máquina CNC, é necessário que o programador tenha um conhecimento sólido em diversas áreas, como mecânica, processos de usinagem e tecnologias da informação. Eles também precisam entender profundamente a linguagem-G, além de outras linguagens de programação aplicadas à usinagem. Ademais, a capacidade de interpretar desenhos técnicos e estar atualizado com as últimas tendências tecnológicas é fundamental para assegurar a precisão e eficiência nas operações de fabricação.

Essa convergência entre o avanço tecnológico, a automação e a segurança permitiu que a tecnologia CNC se consolidasse como uma ferramenta vital para a indústria moderna, moldando o futuro da manufatura de forma sustentável e eficiente.

2.4 Linguagem G

A linguagem G, ou *G-code*, foi desenvolvida para padronizar as instruções que as máquinas CNC recebem, permitindo que elas executem movimentos e processos de fabricação com base em um conjunto de comandos legíveis para os controladores. Na linguagem-G, os comandos são geralmente representados por letras e números, onde a letra indica o tipo de operação e o número especifica detalhes da execução. A letra “G”, por exemplo, refere-se aos comandos de movimento da máquina, como G00 para movimentos rápidos de posicionamento e G01 para movimentos lineares controlados (SANTOS, 2017).

Além dos comandos de movimento, a linguagem-G permite controlar diversos aspectos da operação da máquina, como a velocidade de avanço da ferramenta (*feed rate*), a rotação do *spindle*, as coordenadas tridimensionais do movimento e muito mais. Cada linha de código corresponde a uma instrução específica e é executada de maneira sequencial pela máquina CNC.

A linguagem-G trabalha com sistemas de coordenadas que orientam os movimentos da máquina em eixos cartesianos X, Y e Z, correspondentes aos deslocamentos horizontais, verticais e de profundidade, respectivamente. As instruções também podem definir trajetórias complexas, como arcos e círculos (usando comandos G02 e G03), além de mo-

vimentos incrementais ou absolutos. Porém, no sistema de coordenadas planas para CNC, a orientação dos eixos é inversa ao do sistema cartesiano tradicional, sendo, portanto, que ao invés de (X, Y), utiliza-se (Z, X), conforme indicado na Figura 3.

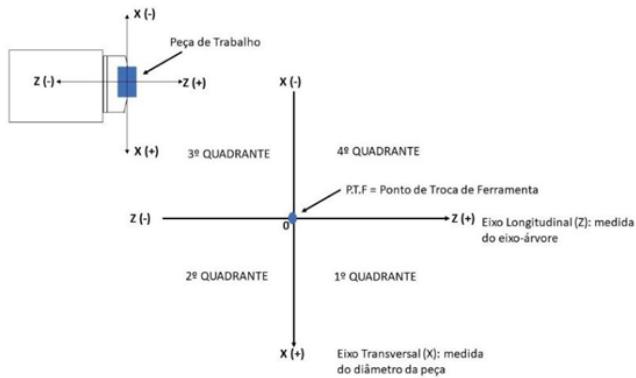


Figura 3 – Sistema de coordenadas planas para CNC (Fonte: ([DIO, 2018](#))).

De acordo com Smid ([SMID, 2003](#)), as principais siglas utilizadas na programação CNC, em particular na linguagem G, são essenciais para o controle das máquinas e processos automatizados. Essas siglas são categorizadas de acordo com suas funções específicas, como controle de movimento, gerenciamento de operações auxiliares, seleção de ferramentas e outros aspectos da operação da máquina.

- **Comandos G:** Instruem a ferramenta sobre como se mover no espaço de trabalho. Controlam movimentos lineares, circulares e de posicionamento rápido, além de definir planos de trabalho e unidades de medida.
- **Comandos M:** Gerenciam aspectos auxiliares, como o acionamento e desligamento do *spindle*, controle de lubrificantes e outros recursos de suporte.
- **Comandos T:** Usados para a seleção de ferramentas, permitindo a troca automática durante o processo de usinagem, o que reduz o tempo ocioso.
- **Comandos F:** Controlam a taxa de avanço da ferramenta (feed rate), essencial para garantir qualidade no acabamento e evitar desperdícios.
- **Comandos S:** Determinam a velocidade de rotação do *spindle*, ajustada conforme o material em usinagem, garantindo segurança e eficiência.

Conforme já comentado, os comandos X, Y e Z representam as coordenadas no espaço tridimensional, definindo onde a ferramenta deve atuar em relação à peça. Esses comandos são fundamentais para garantir que a usinagem ocorra no ponto desejado. Comandos como I, J e K são utilizados para especificar deslocamentos nos eixos durante

a execução de movimentos circulares ou arcos, permitindo à máquina traçar curvas e contornos complexos com alta precisão.

Por ser uma linguagem padronizada, a linguagem-G pode ser utilizada em diferentes tipos de máquinas CNC, como fresadoras, tornos e máquinas de corte a laser, sendo compatível com diversos softwares de CAM (*Computer-Aided Manufacturing*), que convertem modelos CAD (*Computer-Aided Design*) em instruções na linguagem-G. A precisão e o controle oferecidos por essa linguagem a tornam uma ferramenta essencial na indústria de manufatura moderna, permitindo a produção automatizada de peças com tolerâncias apertadas e geometrias complexas.

Embora seja considerada uma linguagem de baixo nível por lidar diretamente com o controle da máquina, a linguagem-G é extremamente eficiente e continua sendo um padrão fundamental na fabricação automatizada.

2.5 Características de um CNC

As máquinas-ferramentas independentes, como tornos e fresadoras, podem ser conectadas a um computador e, com o software adequado, transformam-se em máquinas controladas por CNC. Essa tecnologia permite que os equipamentos operem com alta precisão, aumentando a eficiência e a repetibilidade dos processos de usinagem. Quando uma máquina é projetada para executar diversas operações de usinagem, como torneamento, fresamento, furação e rosqueamento em um único equipamento, ela é denominada *centro de usinagem*. Este tipo de máquina se destaca por sua versatilidade e é amplamente utilizado em indústrias de manufatura, especialmente em linhas de produção que exigem agilidade e flexibilidade.

Uma característica importante dos centros de usinagem é o porta-ferramentas do tipo revólver, que facilita a troca rápida de ferramentas durante o processo de usinagem, otimizando o tempo de produção e reduzindo o desgaste das máquinas. Anos atrás, os operadores de máquinas convencionais, como os torneiros mecânicos, eram altamente valorizados no mercado industrial. Hoje, essa valorização se estende ao programador de centros de usinagem, um profissional especializado que se destaca por sua responsabilidade em programar todas as operações, interpretar ordens de produção e garantir que as máquinas funcionem de maneira eficiente e segura. Esse profissional se tornou peça-chave no mercado, pois sua expertise permite a integração de várias etapas do processo de usinagem em uma única máquina, o que antes exigia múltiplos equipamentos para a execução de tarefas diferentes.

Com a introdução dos centros de usinagem, houve um grande avanço na produção industrial. O uso dessas máquinas permitiu uma redução significativa dos custos de produção em grandes lotes, ao mesmo tempo em que aumentou a agilidade e melhorou a

qualidade dos produtos. Essas máquinas possibilitaram uma produção seriada mais rápida, precisa e padronizada, aspectos que são essenciais para atender às demandas industriais de maneira eficiente e competitiva (FITZPATRICK, 2013).

Nos últimos tempos, o setor industrial tem se voltado para a Indústria 4.0, um conceito que representa um novo paradigma de produção automatizada e conectada. Essa inovação inclui o processo de usinagem, no qual máquinas e sistemas de produção se comunicam diretamente entre si em um ambiente autônomo e inteligente. Nesse cenário, ocorre um diálogo entre máquinas, onde sistemas tomam decisões automáticas relacionadas à produção, custos, contingências e segurança, utilizando modelos de inteligência artificial. Embora esse conceito tenha ganhado força principalmente na Alemanha, o Brasil ainda está em um estágio inicial de adoção da Indústria 4.0, especialmente no setor de usinagem, onde os avanços práticos ainda são limitados.

Em processos de usinagem CNC, assim como em qualquer outro processo de fabricação, a documentação detalhada das operações é crucial. De acordo com (CORRER, 2006), quando as informações relacionadas ao *setup* de uma peça não são devidamente registradas, pode-se enfrentar perdas significativas de tempo na preparação de futuras operações. O *setup* envolve todos os procedimentos necessários para preparar a máquina antes de iniciar a usinagem, como a seleção e a preparação de ferramentas, dispositivos de fixação e definição de parâmetros de operação. A falta de documentação pode resultar na repetição desnecessária de tarefas demoradas, como o ajuste de ferramentas e dispositivos, além da configuração de parâmetros de usinagem.

Para evitar esse tipo de desperdício, o autor (CORRER, 2006) recomenda a criação de documentos padronizados, conhecidos como folhas de processo. Essas folhas devem conter informações detalhadas sobre o *setup*, como a montagem de dispositivos de fixação, listas de ferramentas e parâmetros de usinagem. Além disso, o uso de recursos visuais, como fotografias ou vídeos, pode auxiliar na documentação do processo, permitindo uma visão clara e objetiva das etapas envolvidas, como a fixação da peça, o carregamento do *magazine* de ferramentas, entre outros detalhes operacionais. Essa atenção à documentação e à padronização dos processos contribui para a melhoria contínua na usinagem CNC, garantindo maior eficiência, qualidade e economia no ambiente de produção.

2.6 Computer-Aided Design / Computer-Aided Manufacturing

O uso de sistemas CAD e CAM revolucionou a indústria de manufatura, especialmente em processos de usinagem. O CAD permite a criação e modelagem de peças e componentes diretamente em um ambiente digital, facilitando a visualização, edição e ajuste de projetos com precisão. Isso é especialmente útil na usinagem, onde a complexidade geométrica das peças frequentemente requer ajustes detalhados e prototipagem

virtual antes da fabricação.

O sistema CAM, por outro lado, traduz os modelos digitais desenvolvidos no CAD em comandos específicos que controlam máquinas-ferramentas CNC. Essa integração entre CAD e CAM automatiza boa parte do processo produtivo, minimizando a intervenção manual e os erros associados, além de otimizar o tempo e o custo de fabricação.

Na usinagem de placas planas, o uso de CAD/CAM proporciona diversos benefícios, pois, primeiramente, o projeto das placas pode ser realizado de forma mais eficiente, permitindo que os engenheiros e operadores façam simulações do processo de usinagem e avaliem a melhor estratégia de corte antes de iniciar a produção. Em seguida, esses sistemas geram os códigos G e M necessários para controlar a máquina CNC, automatizando tarefas como fresamento, furação e acabamento.

Além disso, o uso de CAD/CAM possibilita uma usinagem de alta precisão e repetibilidade, o que é fundamental em processos seriados ou na produção de peças que exigem rigorosas tolerâncias dimensionais. A capacidade de armazenar e replicar projetos digitais permite que peças idênticas sejam fabricadas em lotes grandes, com a certeza de que todas estarão dentro das especificações estabelecidas.

Outro ponto importante é a capacidade de otimizar os parâmetros de usinagem automaticamente. Os softwares CAM permitem simular diferentes cenários de corte, considerando variáveis como a escolha de ferramentas, velocidades de rotação, avanço e profundidade de corte. Isso contribui para uma usinagem mais eficiente, reduzindo o tempo de ciclo e o desgaste das ferramentas, além de melhorar a qualidade do acabamento superficial.

Portanto, a adoção de sistemas CAD/CAM em processos de usinagem não apenas eleva o nível de automação e precisão das operações, mas também impulsiona a competitividade das empresas ao oferecer produtos com alta qualidade, menores custos de produção e prazos reduzidos. Dessa forma, o CAD/CAM torna-se uma ferramenta indispensável para a indústria moderna de manufatura, sendo um pilar de suporte para a evolução contínua dos processos de usinagem.

2.7 Vida de Ferramenta

A vida de ferramenta em usinagem refere-se ao período durante o qual uma ferramenta de corte pode ser utilizada antes de atingir um nível de desgaste que comprometa sua eficiência. Esse conceito é central para a operação de qualquer processo de usinagem, uma vez que afeta diretamente a qualidade do produto, o tempo de produção e os custos operacionais. De acordo com (MACHADO et al., 2015), a vida de uma ferramenta pode ser influenciada por uma série de fatores, como o tipo de material da peça que está sendo

usinada, as condições de corte aplicadas (incluindo velocidade, avanço e profundidade de corte), o tipo de ferramenta utilizada e a aplicação de fluidos de corte para resfriamento e lubrificação.

Para mensurar a vida das ferramentas, uma das melhores maneiras é através do monitoramento do seu desgaste. A ferramenta é desgastada devido à uma combinação de fatores mecânicos e térmicos que geram atrito entre a ferramenta e o material da peça. Esse atrito produz calor e estresse nas superfícies de contato, o que acelera o desgaste da ferramenta. Existem diferentes tipos de desgaste que podem afetar a vida da ferramenta, incluindo o desgaste de flanco, o desgaste de cratera, e o lascamento ([Sousa; Silva, 2020](#); [Szczotkarz et al., 2021](#)). O desgaste de flanco é o mais comum, sendo causado pela fricção entre o flanco da ferramenta e a superfície usinada, enquanto o desgaste de cratera acontece na face da ferramenta devido ao contato com o cavaco.

De acordo com ([Pimenov et al., 2024](#)), uma ferramenta com desgaste excessivo pode resultar em problemas na peça usinada, como imprecisões nas dimensões, superfícies de má qualidade e aumento do tempo de ciclo de produção, além de aumentar o risco de quebra da ferramenta. Para mitigar esses problemas e prolongar a vida da ferramenta, é necessário ajustar cuidadosamente as condições de corte e utilizar fluidos de corte específicos. Esses fluidos ajudam a reduzir o calor gerado durante a usinagem e a remover os cavacos da zona de corte, prevenindo o acúmulo de material que poderia danificar a ferramenta.

Além dos fatores de operação, o material da ferramenta também desempenha um papel importante. Ferramentas feitas de materiais mais resistentes, como cerâmicas avançadas, carboneto cimentado, Nitreto de Boro Cúbico (CBN) ou Diamante Policristalino (PCD), tendem a ter uma vida útil mais longa em comparação com aquelas feitas de aço rápido (HSS), devido à sua maior resistência ao calor e ao desgaste ([Pimenov et al., 2024](#)). No entanto, essas ferramentas de alta performance também são mais caras, o que faz com que o custo-benefício de sua utilização deva ser cuidadosamente avaliado com base na aplicação específica.

Economicamente falando, é de suma importância monitorar e gerenciar a vida da ferramenta, e muitos sistemas de usinagem CNC atuais são equipados com sensores que monitoram o desgaste da ferramenta em tempo real, ajustando os parâmetros de corte de acordo com a condição da ferramenta para prolongar sua vida útil. Esse tipo de monitoramento é parte de um movimento maior em direção à automação e à usinagem inteligente, que busca otimizar cada aspecto do processo de produção para reduzir custos e melhorar a eficiência. Por fim, uma gestão adequada da vida útil das ferramentas em usinagem resulta não apenas em uma produção mais efetiva, mas também em uma redução significativa dos custos operacionais, já que substituições frequentes de ferramentas, interrupções para ajustes e peças defeituosas são minimizadas.

2.8 Empacotamento

O problema de empacotamento bidimensional, conhecido como *nesting*, consiste em organizar um conjunto de peças dentro de uma área delimitada, como uma chapa plana, de forma a minimizar o desperdício de material. Esse problema é classificado como NP-difícil, o que implica que não existem algoritmos eficientes que garantam soluções ótimas para todos os casos em tempo polinomial (HAESSLER; SWEENEY, 1991). A complexidade aumenta quando as peças possuem formas irregulares ou quando são permitidas rotações e translações, exigindo abordagens heurísticas ou meta-heurísticas para encontrar soluções satisfatórias em tempo razoável.

Historicamente, o problema de corte e empacotamento surgiu na década de 1930, com os trabalhos de Kantorovich sobre métodos matemáticos para organização e planejamento da produção (KANTOROVICH, 1960). Desde então, diversas abordagens foram propostas, incluindo programação linear, algoritmos genéticos, algoritmos de busca local e métodos baseados em inteligência artificial. Essas técnicas visam otimizar o arranjo das peças, considerando restrições como dimensões da chapa, formas das peças e requisitos de produção.

Na indústria de usinagem de placas planas, como na fabricação de móveis, calçados e componentes metálicos, o problema de nesting é particularmente relevante. A eficiência no aproveitamento do material impacta diretamente nos custos de produção e na sustentabilidade do processo. Ferramentas computacionais que implementam algoritmos de nesting auxiliam na geração de layouts otimizados, reduzindo o desperdício e melhorando a produtividade (JÚNIOR; PINHEIRO, 2016). Além disso, a integração dessas ferramentas com sistemas CAD/CAM permite uma automação mais eficiente do processo de corte.

As variáveis envolvidas no problema de nesting incluem as dimensões da chapa, as formas e tamanhos das peças, as restrições de posicionamento (como rotações permitidas), as tolerâncias de corte e as prioridades de produção. A modelagem matemática dessas variáveis é essencial para a aplicação de algoritmos de otimização. Por exemplo, em problemas de corte de peças retangulares, é comum utilizar modelos de programação linear inteira para representar as possíveis combinações de cortes e minimizar o desperdício (HAESSLER; SWEENEY, 1991). Em casos mais complexos, como o empacotamento de peças irregulares, são empregadas técnicas como algoritmos genéticos e busca tabu para explorar o espaço de soluções de forma eficiente.

2.9 Pynest

O `pynest2d` é uma biblioteca em Python desenvolvida pela empresa Ultimaker que atua como uma interface de alto nível para a biblioteca C++ `libnest2d`, permitindo

que funcionalidades de empacotamento bidimensional sejam utilizadas diretamente em aplicações Python, com simplicidade e eficiência ([ULTIMAKER, 2025](#)). Essa integração facilita a incorporação de algoritmos de otimização de corte em sistemas de produção, especialmente em contextos onde o controle do desperdício de material é crucial, como na indústria moveleira, de calçados e metalúrgica.

A biblioteca `libnest2d`, por sua vez, é um projeto de código aberto que oferece uma implementação flexível e configurável de algoritmos de nesting para peças bidimensionais. Seu objetivo principal é organizar automaticamente formas complexas dentro de uma área delimitada de forma a minimizar o espaço vazio e o desperdício ([MESZAROS, 2025](#)). A biblioteca oferece suporte a diversas restrições geométricas, como espaçamento entre peças, rotação limitada e bordas da chapa, sendo ideal para sistemas CAM.

A estratégia de empacotamento utilizada no `libnest2d` baseia-se em heurísticas evolutivas, mais especificamente em algoritmos genéticos, combinados com estratégias de colocação guiadas por reticulado (*grid-based placement*). Inicialmente, gera-se uma população de soluções possíveis (*layouts*) e, por meio de operações como mutação, cruzamento e seleção, essas soluções evoluem ao longo de múltiplas gerações, até que se atinja um arranjo considerado satisfatório. Essa abordagem permite alcançar resultados de alta qualidade mesmo em cenários com grande complexidade geométrica, equilibrando desempenho computacional e aproveitamento de material ([MESZAROS, 2025](#)).

2.10 Considerações Finais

Através desta revisão bibliográfica, destaca-se que o entendimento da teoria de usinagem é extremamente importante para entender os desafios relacionados ao aproveitamento de materiais, especialmente em processos que envolvem ligas de alta performance. Além disso, a compreensão das tecnologias de otimização, como a biblioteca `pynest2d`, é fundamental para a construção de algoritmos para o empacotamento e corte de peças. Contudo, ainda existem desafios a serem superados, como a adaptação do `pynest2d` a diferentes cenários produtivos, o que reforça a importância de futuras pesquisas para expandir as capacidades dessa ferramenta e sua aplicação prática na indústria.

3 Metodologia

No processo de usinagem de placas planas, um dos principais desafios enfrentados pelas indústrias é a economia de material e a organização do percurso da máquina durante a operação. Na maioria dos casos, as peças usinadas apresentam geometrias complexas e precisam ser dispostas de forma estratégica para minimizar a quantidade de retalhos desperdiçados. Este trabalho analisa um problema desse tipo, buscando otimizar a distribuição das peças para reduzir ao máximo a perda de material ao longo do processo. Além disso, o estudo considera um cenário em que as ordens de produção chegam de forma distribuída ao longo de vários dias, o que dificulta o planejamento das peças e aumenta o risco de desperdícios. Pela Figura 4 é possível observar um exemplo deste problema, mostrando a importância da organização das peças na placa para evitar o desperdício de material.

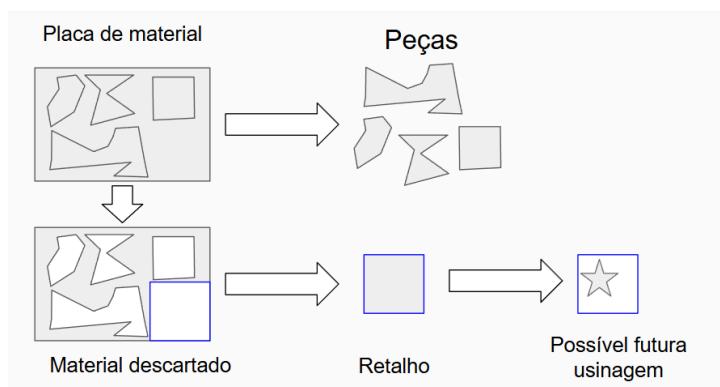


Figura 4 – Exemplo de organização das peças em uma placa plana.

Para encontrar uma melhor forma de organizar a disposição das peças durante a usinagem, foi utilizada a biblioteca `pynest2d` ([ULTIMAKER, 2025](#)) da linguagem Python, uma ferramenta de otimização baseada no conceito de *nesting*, que, ao ser aplicado, busca a melhor disposição das peças nas placas de matéria-prima. O algoritmo do `pynest2d` emprega técnicas de otimização combinatória e heurísticas para organizar as peças de forma eficiente, levando em consideração tanto suas características geométricas quanto as restrições operacionais das máquinas.

Entre essas restrições do problema, é importante saber que as placas usinadas devem manter o padrão retangular e ter uma área mínima de 1 metro quadrado, para garantir a fixação adequada na máquina CNC. Dessa forma, a melhor abordagem para o algoritmo é permitir que as peças usinadas sejam organizadas de forma com que o material excedente resulte em uma placa plana com dimensões superiores ao limite estabelecido, como ilustrado no exemplo da Figura 4. O `pynest2d` se destaca nesse processo,

pois identifica arranjos que maximizam o aproveitamento da área disponível e minimizam os retalhos gerados. Em cenários ideais, nos quais todas as peças estão disponíveis simultaneamente, ele consegue reduzir significativamente a perda de matéria-prima.

Entretanto, no caso estudado, a produção é realizada com base em ordens de produção recebidas em momentos distintos, o que exige que as usinagens sejam realizadas em dias separados. Essa dinâmica adiciona complexidade ao problema, pois a otimização não se limita a uma única operação, mas deve considerar os impactos cumulativos das usinagens realizadas ao longo do tempo. Por exemplo, quando as ordens são processadas imediatamente após sua chegada, sem acumular pedidos, a probabilidade de gerar retalhos inadequados para reaproveitamento em futuras usinagens aumenta. Isso ressalta a importância de equilibrar o uso do algoritmo com estratégias de planejamento que considerem o fluxo contínuo de produção.

3.1 Fluxo das Etapas

A Figura 5 ilustra o fluxo das etapas desenvolvidas neste estudo.

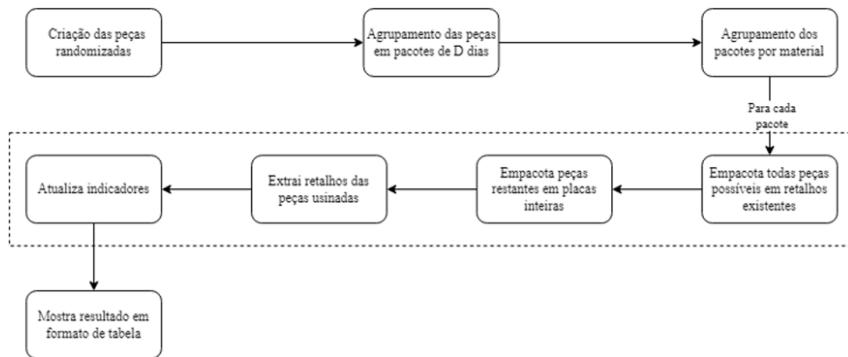


Figura 5 – Fluxo das etapas de todo o processo.

O simulador desenvolvido tem como objetivo otimizar a alocação de peças em placas de material, minimizando desperdícios e maximizando o aproveitamento dos recursos disponíveis. Para isso, ele se fundamenta em três estruturas de dados principais: a lista de peças, que armazena a geometria de cada peça (definida por pontos no plano cartesiano), a data de usinagem e o identificador do material; a lista de materiais, onde são registradas as dimensões das placas disponíveis, classificadas por tipo de material; e o dicionário de retalhos, responsável por registrar as sobras de placas resultantes de cortes anteriores, permitindo sua reutilização em futuras alocações.

O funcionamento do simulador inicia-se pela criação das peças de forma randomizada, simulando diferentes demandas de produção. Em seguida, essas peças são agrupadas em pacotes que abrangem D dias de planejamento, possibilitando um melhor controle do

fluxo de produção ao longo do tempo. Uma vez organizadas temporalmente, as peças são agrupadas por material, o que evita trocas constantes de matéria-prima durante a usinagem e contribui para a otimização do estoque.

Para cada pacote, o processo de empacotamento é realizado em duas etapas. Na primeira, o simulador verifica o dicionário de retalhos em busca de sobras disponíveis do mesmo material, alocando o máximo possível de peças nessas sobras e removendo-as do dicionário quando utilizadas. Caso ainda existam peças sem alocação, elas passam para a segunda etapa, em que são empacotadas em placas inteiras. Nessa fase, a biblioteca *pynest2d* é empregada para definir a disposição mais eficiente das peças, levando em conta suas dimensões e a área útil de cada placa, de modo a maximizar o aproveitamento e minimizar a geração de retalhos.

Após a usinagem, o sistema identifica e extrai novos retalhos gerados, desde que possuam área superior a um valor mínimo estabelecido, e os adiciona novamente ao dicionário de retalhos para uso em futuras execuções. Durante todo o fluxo, o simulador atualiza seus indicadores de desempenho que permitem avaliar a eficiência do processo, destacando-se: a taxa de aproveitamento do material, medida pela razão entre a área efetivamente utilizada e a área total das placas; a quantidade de retalhos gerados, que aponta oportunidades de redução de desperdício; e a eficiência global da alocação, avaliando o desempenho do empacotamento em cada pacote.

Por fim, os resultados são apresentados em formato de tabela, o que facilita a análise dos ganhos obtidos com a otimização e possibilita a tomada de decisões para reduzir custos e tornar o processo de manufatura mais sustentável. A seguir, é apresentado o pseudocódigo que contempla toda a lógica construída do fluxo:

```
INICIO
    LER lista_de_pecas, lista_de_materiais, dicionario_de_retalhos
    DEFINIR dias_de_planejamento, area_minima_retalho
    AGRUPAR lista_de_pecas em pacotes de dias_de_planejamento
    PARA CADA pacote EM pacotes_de_producao:
        AGRUPAR pacote por identificador_de_material
        PARA CADA material EM pacote:
            SE material ESTÁ EM dicionario_de_retalhos:
                PARA CADA retalho EM dicionario_de_retalhos[material]:
                    AGRUPAR pecas_compatíveis_no_retalho(retalho)
                    REMOVER retalho do dicionario_de_retalhos[material]
                    AGRUPAR pecas_restantes_em_placas_inteiras(material, lista_de_materiais)
                    IDENTIFICAR novos_retalho_retangulares(area_minima_retalho)
                    ADICIONAR novos_retalhos AO dicionario_de_retalhos[material]
            CALCULAR indicadores(A, B, C)
            EXIBIR indicadores
FIM
```

Figura 6 – Pseudocódigo do problema.

4 Resultados e Discussões

Nesta seção, são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir do estudo da aplicação do algoritmo `pynest2d` ([ULTIMAKER, 2025](#)) no processo de usinagem de placas planas. As análises incluem o impacto do aumento do período de planejamento na redução do número de ciclos de usinagem, na minimização da geração de retalhos e na otimização do consumo de placas e área de matéria-prima. Os resultados são discutidos em diferentes aspectos, destacando a influência do planejamento na eficiência operacional e nos ganhos proporcionados pelo uso do algoritmo. Além disso, são apresentados dados quantitativos que evidenciam as melhorias alcançadas, permitindo uma avaliação detalhada do impacto de cada variável estudada.

4.1 Detalhamento do Processo de Usinagem

Os resultados apresentados nas Tabelas 1 e 2 detalham os valores obtidos no processo de usinagem com a aplicação do algoritmo `pynest2d`. À medida que o número de dias de planejamento aumenta, observa-se uma expressiva redução no número de usinagens necessárias, na geração de retalhos, no consumo de placas e na área total de matéria-prima utilizada, mostrando que o aumento no número de dias planejados exibe um ganho positivo. Além disso, há um aumento considerável na eficiência média do aproveitamento do material.

Tabela 1 – Detalhamento do processo de usinagem em percentual.

Dias de planejamento	Redução de usinagens (%)	Redução de retalhos (%)	Redução do total de placas (%)	Redução da área total (m ²) (%)	Aumento da eficiência (%)
1 dia	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2 dias	10,48%	23,27%	5,90%	5,93%	6,29%
3 dias	17,20%	39,53%	9,21%	9,22%	10,16%
4 dias	21,39%	49,36%	11,38%	11,41%	12,87%
5 dias	23,85%	53,68%	13,18%	13,23%	15,23%
6 dias	27,27%	62,22%	14,77%	14,78%	17,33%

Tabela 2 – Detalhamento do processo de usinagem em valores absolutos.

Dias de planejamento	Redução de usinagens	Redução de retalhos	Redução de placas	Redução da área (m ²)	Aumento da eficiência (%)
1 dia	0	0	0	0 m ²	0,00%
2 dias	340	199	141	385 m ²	2,72%
3 dias	558	338	220	599 m ²	4,39%
4 dias	694	422	272	741 m ²	5,56%
5 dias	774	459	315	859 m ²	6,58%
6 dias	885	532	353	960 m ²	7,49%

É importante ressaltar que, apesar das variações nos dias de produção e no número de placas utilizadas, o número total de peças permanece constante, totalizando 13.039 unidades, com uma média de 2.173 placas utilizadas. Isso demonstra que a otimização proporcionada pelo planejamento estratégico não afeta o volume de produção, mas sim a eficiência do processo.

Por exemplo, a redução no número de usinagens realizadas é notável já com 2 dias de planejamento, resultando em uma diminuição de 340 ciclos (10,48%) em comparação ao cenário de apenas 1 dia. Esse efeito se torna ainda mais evidente com 6 dias de planejamento, quando a redução alcança 885 ciclos (27,27%). Esses dados indicam que um intervalo maior entre os planejamentos permite agrupar as ordens de produção de forma mais eficiente, maximizando a ocupação das placas e reduzindo o número total de ciclos de produção necessários. Tal abordagem reforça a importância de um planejamento estratégico eficiente para a sustentabilidade e a economia do processo de usinagem.

A diminuição na quantidade de retalhos gerados segue uma tendência similar. Com 2 dias de planejamento, a redução é de 199 unidades (23,27%), enquanto com 6 dias atinge 532 unidades (62,22%). O consumo total de placas também é reduzido de forma significativa, com uma economia de 141 unidades (5,90%) com 2 dias e de 353 unidades (14,77%) com 6 dias de planejamento. Essa redução está diretamente associada à melhoria no posicionamento das peças nas placas, o que diminui o número necessário de materiais para atender à mesma demanda de produção.

Por fim, um outro aspecto destacado é a redução na área total de matéria-prima utilizada. Enquanto com 2 dias de planejamento há uma economia de 385 m² (5,93%), com 6 dias chegou a 960 m² (14,78%). Além disso, a eficiência média da matéria-prima aumenta proporcionalmente ao período de planejamento, saltando de 6,29% com 2 dias para 17,33% com 6 dias.

4.2 Análise da Quantidade de Retalhos Gerados

Os dados apresentados na Tabela 3 evidenciam a relação entre o número de dias considerados no planejamento de usinagem e a quantidade de retalhos gerados.

Tabela 3 – Descrição tabular dos retalhos usinados

Dias de planejamento	Retalhos usinados	Redução (abs)	Redução (%)
1	855	0	0,00%
2	656	199	23,27%
3	517	338	39,53%
4	433	422	49,36%
5	396	459	53,68%
6	323	532	62,22%

Inicialmente, quando o planejamento abrange apenas um único dia, o total de retalhos gerados é de 855 unidades. Esse valor é tomado como referência para avaliar os efeitos do aumento no horizonte de planejamento. À medida que o planejamento se estende para mais dias, observa-se uma redução progressiva na quantidade de retalhos, indicando uma melhoria no aproveitamento da matéria-prima. Com dois dias de planejamento, a quantidade de retalhos cai para 656 unidades, o que já demonstra uma diferença considerável em relação ao cenário inicial. Essa redução se intensifica à medida que mais dias são incorporados ao planejamento. Quando três dias são considerados, o total de retalhos é reduzido para 517 unidades, e essa tendência de diminuição continua de forma consistente. Em quatro dias, o valor atinge 433 unidades, enquanto em cinco dias é reduzido ainda mais, chegando a 396 unidades. No cenário mais otimizado, com seis dias de planejamento, a quantidade de retalhos atinge o menor valor registrado, 323 unidades.

A Tabela 3 também detalha as reduções obtidas em relação ao cenário de um dia de planejamento, tanto em termos absolutos quanto percentuais. Por exemplo, ao ampliar o planejamento para dois dias, há uma redução de 199 unidades, o que equivale a 23,27%. Essa porcentagem aumenta gradualmente conforme o horizonte de planejamento se expande, alcançando 62,22% no caso de seis dias.

Para enriquecer esta análise, foi realizada a criação de um gráfico (Figura 7) que ilustra a diferença percentual na redução de retalhos entre dias consecutivos de planejamento ao longo do tempo. O gráfico revela que o maior impacto ocorre entre o primeiro e o segundo dia, com uma redução percentual de 23,27%. Entre o segundo e o terceiro dia, a redução ainda é expressiva, mas menor, alcançando 16,26%. Esse padrão de desaceleração na redução dos retalhos continua com 9,83% entre o terceiro e o quarto dia e apenas 4,32% entre o quarto e o quinto dia.

Entretanto, observa-se uma leve inflexão no ganho percentual ao passar de cinco para seis dias, com uma variação de 8,54%. Esse comportamento pode ser interpretado como resultado de uma combinação de fatores que se tornam mais relevantes na ampliação do planejamento. Uma possível explicação para essa variação está na capacidade do *pynest2d* ([ULTIMAKER, 2025](#)) de identificar e incorporar peças menores ou com formatos específicos que antes não podiam ser acomodadas de forma eficiente. Com um maior número de ordens de produção disponíveis, o algoritmo é capaz de realizar arranjos mais densos e precisos, aproveitando ao máximo o espaço disponível na matéria-prima. Essa hipótese ganha força ao considerar que peças menores, embora geralmente mais difíceis de agrupar devido à sua diversidade de formatos, podem preencher lacunas entre peças maiores, reduzindo as áreas inutilizadas. O *pynest2d*, ao lidar com um volume maior de dados e com maior flexibilidade de agrupamento, consegue equilibrar a distribuição das peças, otimizando cortes e minimizando desperdícios. O aumento no ganho percentual, embora menos expressivo em relação às primeiras etapas de ampliação, demonstra que a

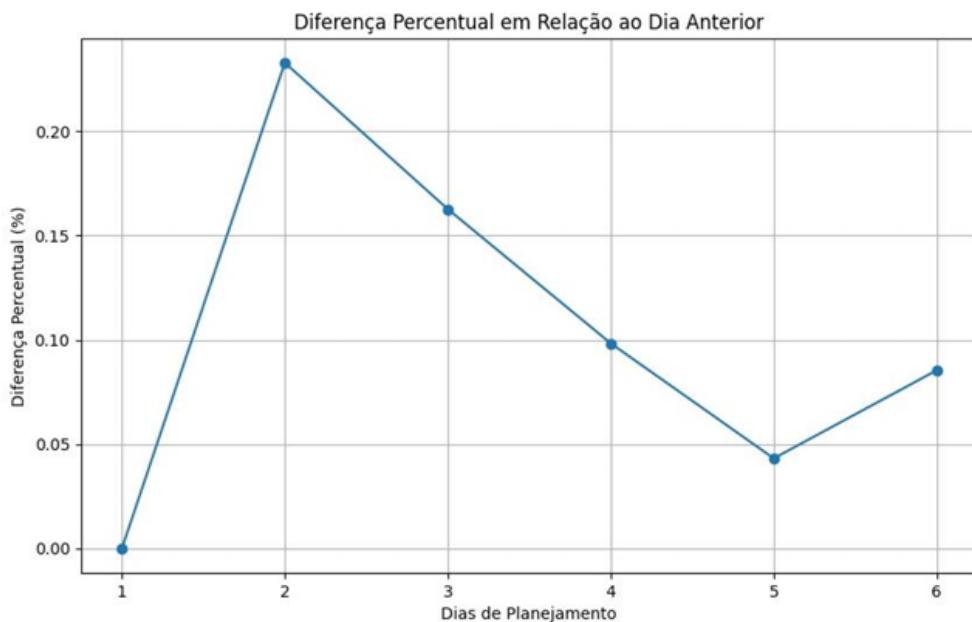


Figura 7 – Percentual de diferença de redução dos retalhos por dia.

Figura 7 – Percentual de diferença de redução dos retalhos por dia

ferramenta alcança um nível mais refinado de eficiência, mesmo em condições em que as possibilidades de otimização começam a se estabilizar.

Além disso, o comportamento observado sugere que o alinhamento entre tecnologia e planejamento estratégico desempenha um papel central na obtenção desses resultados. O acréscimo de um dia adicional ao horizonte permite ao *pynest2d* trabalhar com configurações mais complexas e explorar combinações que não seriam possíveis em um período mais curto. Essa interação entre maior janela de planejamento e capacidade de agrupamento contribui para o impacto cumulativo observado, onde reduções de desperdício se tornam mais evidentes e significativas à medida que o horizonte se amplia.

Por fim, a inflexão observada ao passar de cinco para seis dias reflete a eficiência progressiva da integração de ferramentas avançadas como o *pynest2d* no processo de usinagem. Essa integração não só evidencia o potencial da tecnologia em maximizar o aproveitamento do material, mas também destaca a relevância de incorporar peças de diferentes tamanhos e formatos em um planejamento bem estruturado. Assim, o aumento percentual observado, mesmo que menos expressivo, reforça a importância de um planejamento de longo prazo aliado a soluções tecnológicas robustas para alcançar reduções consistentes no desperdício de material.

4.3 Análise do Consumo de Matéria Prima

A Tabela 4 apresentada analisa o consumo de matéria-prima em metros quadrados (m^2) com base no número de dias considerados no planejamento, destacando as reduções absolutas e percentuais em relação ao cenário inicial de um dia de planejamento.

Tabela 4 – Informações sobre o consumo de matéria prima

Dias de planejamento	M^2 de matéria prima	Redução com relação a 1 dia	Redução com relação a 1 dia (%)
1	6494 m^2	0 m^2	0,00%
2	6109 m^2	385 m^2	5,93%
3	5895 m^2	599 m^2	9,22%
4	5753 m^2	741 m^2	11,41%
5	5635 m^2	859 m^2	13,23%
6	5534 m^2	960 m^2	14,78%

No início, com apenas um dia de planejamento, o consumo de matéria-prima é de 6494 m^2 , tomado como referência para as comparações subsequentes. À medida que o horizonte de planejamento é expandido, observa-se uma redução progressiva no consumo, evidenciando o impacto positivo do planejamento a médio e longo prazo. Com dois dias, o consumo é reduzido para 6109 m^2 , representando uma economia de 385 m^2 , ou 5,93%. Essa redução se intensifica com três dias, onde o consumo diminui para 5895 m^2 , o que equivale a uma economia acumulada de 599 m^2 , ou 9,22%.

A tendência de redução contínua no consumo de matéria-prima prossegue conforme o horizonte de planejamento se expande. Com quatro dias, o consumo cai para 5753 m^2 , marcando uma economia de 741 m^2 em relação ao cenário inicial, ou 11,41%. Em cinco dias, o consumo é reduzido para 5635 m^2 , resultando em uma economia acumulada de 859 m^2 , ou 13,23%. Por fim, no cenário mais otimizado, com seis dias de planejamento, o consumo atinge 5534 m^2 , representando uma economia total de 960 m^2 , ou 14,78%.

Adicionalmente, o gráfico da Figura 8 que representa a relação entre o número de dias de planejamento e a diferença percentual em relação ao consumo do dia anterior revela um comportamento interessante. Ele visualiza a dinâmica de redução percentual no consumo de matéria-prima conforme o horizonte de planejamento é ampliado. No início, a redução percentual é mais expressiva, com um pico de 5,93% ao passar de um para dois dias de planejamento. Esse ganho inicial reflete a eficácia de incorporar mesmo pequenas expansões no horizonte de planejamento, permitindo ajustes mais eficientes na alocação de ordens de produção.

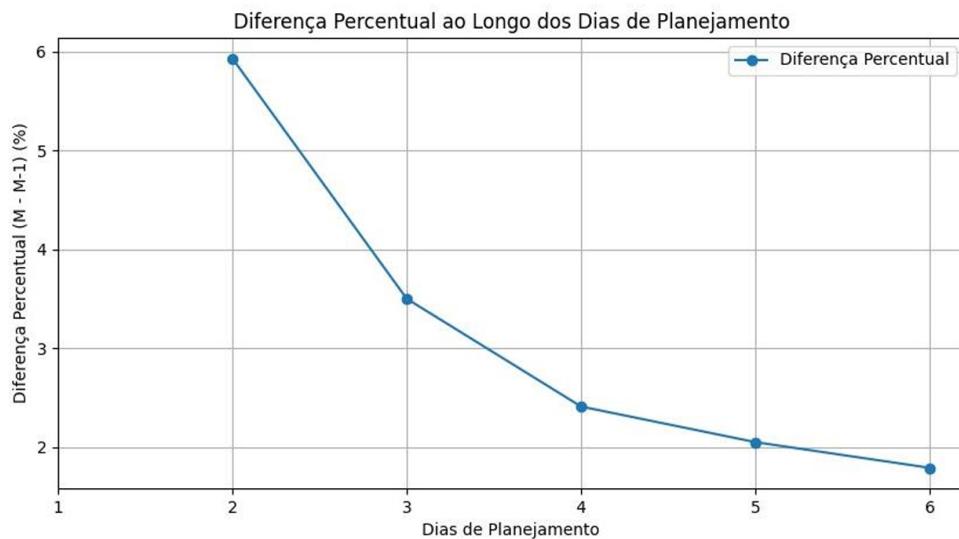


Figura 8 – Diferença percentual ao longo dos dias de planejamento

Conforme o planejamento se estende, a diferença percentual diminui de forma gradual, indicando uma tendência de estabilização na eficiência adicional obtida. Por exemplo, ao passar de três para quatro dias, a redução percentual é de 2,41%, enquanto de cinco para seis dias é ainda mais sutil, atingindo 1,79%. Esses valores, embora modestos, acumulam ganhos importantes quando considerados no longo prazo.

O gráfico também permite inferir que a redução percentual mais modesta em períodos mais longos pode estar associada a limitações na capacidade de identificar padrões de otimização adicionais ou mesmo ao ponto de saturação no aproveitamento da matéria-prima com os recursos disponíveis. Ainda assim, essas reduções, mesmo que menores, são relevantes, pois contribuem para economias cumulativas expressivas no cenário final, principalmente dentro do contexto de usinagem, onde a usinagem de algumas ligas específicas pode encarecer bastante o processo.

Para concluir este tópico, tem-se que a análise combinada entre a tabela e o gráfico reforça a importância de ferramentas como o *pynest2d* ([ULTIMAKER, 2025](#)) no suporte ao planejamento. Elas permitem identificar arranjos melhores para o uso de materiais, maximizando o aproveitamento de recursos mesmo quando o horizonte de planejamento apresenta ganhos percentuais menores. No contexto industrial, esses ganhos, ainda que incrementais, podem representar vantagens competitivas significativas, reduzindo custos e aumentando a sustentabilidade dos processos produtivos.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

Neste trabalho, foi desenvolvida uma aplicação para investigação de soluções de otimização baseada no pacote `pynest2d`, o qual otimiza o aproveitamento da matéria-prima. O objetivo foi avaliar o impacto do horizonte de planejamento na redução de desperdícios, comparando diferentes períodos de otimização. A análise considerou variações no tempo de planejamento, desde um até seis dias, e os efeitos dessa ampliação na eficiência do uso do material.

Como conclusão, observou-se que a expansão do horizonte de planejamento resultou em uma redução significativa do desperdício, atingindo uma economia máxima de 14,78% com seis dias. Esse efeito foi atribuído à maior flexibilidade do sistema na organização das peças, permitindo um melhor aproveitamento do espaço disponível. No entanto, verificou-se uma tendência de estabilização dos ganhos à medida que o horizonte se ampliava, sugerindo um limite na capacidade de otimização do algoritmo.

5.2 Sugestões de Trabalhos Futuros

- Uso de redes neurais ou aprendizado de máquina para prever padrões ideais de corte com base em dados históricos, reduzindo desperdícios e melhorando a eficiência do processo.
- Desenvolvimento de um sistema que ajuste a disposição das peças em tempo real, considerando a chegada progressiva de novas ordens de produção e a variabilidade nas dimensões das placas disponíveis.
- Desenvolvimento de um modelo que equilibre múltiplos critérios, como maximização do aproveitamento do material, minimização do tempo de corte e redução do consumo energético das máquinas CNC.

Referências

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 6162: Usinagem – Terminologia.** 1989. Citado na página 13.

CORRER, I. **Projeto e Construção de Um Sistema de Pré-Ajustagem de Ferramentas Interno a Laser Para Uso Em Máquinas-Ferramenta CNC.** 2006. Trabalho acadêmico. Citado na página 19.

DEBNATH, S.; REDDY, M. M.; YI, Q. S. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 83, p. 33–47, 2014. Citado na página 11.

DIO, L. de. **Estudo Sobre a Usinagem Realizada Por Máquinas-Ferramenta Comandadas Por Computadores (CNC).** 2018. Trabalho acadêmico. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 17.

FERNANDES, G. H. N.; BARBOSA, L. M. Q.; FRANÇA, P. H. P.; MARTINS, P. S.; MACHADO, R. Towards green manufacturing: Investigating tool coatings and cooling strategies for inconel 718 turning. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 129, n. 5-6, p. 2257–2279, 2023. Citado na página 12.

FERNANDES, G. H. N.; FERREIRA, E. R.; FRANÇA, P. H. P.; BARBOSA, L. M. Q.; FILHO, E. B.; MARTINS, P. S.; MACHADO, R. Internally cooled tools as an innovative solution for sustainable machining: Temperature investigation using inconel 718 superalloy. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 50, p. 269–284, 2024. Citado na página 8.

FITZPATRICK, M. **Introdução à Usinagem Com CNC.** [S.l.]: AMGH Editora, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 12, 15 e 19.

HAESSLER, R. W.; SWEENEY, P. E. Cutting stock problems and solution procedures. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 54, n. 2, p. 141–150, 1991. Citado na página 22.

HAMDAN, A.; SARHAN, A. A. D.; HAMDI, M. An optimization method of the machining parameters in high-speed machining of stainless steel using coated carbide tool for best surface finish. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 58, n. 1–4, p. 81–91, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 10.

JUNIOR, G. F. A.; FREITAS, R. L. A. **Projeto Mecânico de Um Mini Torno CNC.** 2022. Trabalho acadêmico. Citado na página 16.

JÚNIOR, B. A.; PINHEIRO, P. R. Approaches to tackle the nesting problems. In: **Artificial Intelligence Perspectives in Intelligent Systems.** [S.l.]: Springer, 2016. p. 285–295. Citado na página 22.

KALADHAR, M.; SUBBAIAH, K. V.; RAO, C. H. S. Machining of austenitic stainless steels - a review. **International Journal of Machining and Machinability of Materials**, v. 12, n. 1/2, p. 178, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 10.

- KANTOROVICH, L. V. Mathematical methods of organizing and planning production. **Management Science**, INFORMS, v. 6, n. 4, p. 366–422, 1960. Citado na página 22.
- MACHADO, R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria Da Usinagem Dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2015. Citado 5 vezes nas páginas 4, 11, 12, 14 e 20.
- MESZAROS, T. **libnest2d: A general purpose 2D nesting library**. 2025. Acessado em abril de 2025. Disponível em: <<https://github.com/tamasmeszaros/libnest2d>>. Citado na página 23.
- PIMENOV, D. Y.; SILVA, L. R. R. da; MACHADO, A. R.; FRANÇA, P. H. P.; PINTAUDE, G.; UNUNE, D. R.; KUNTOĞLU, M.; KROLICZYK, G. M. A comprehensive review of machinability of difficult-to-machine alloys with advanced lubricating and cooling techniques. **Tribology International**, v. 196, p. 109677, 2024. Citado na página 21.
- SANTOS, E. P. dos. **CAD/CAM/Usinagem CNC Integrado a Engenharia Reversa**. 2017. Trabalho acadêmico. Citado na página 16.
- SILVA, S. Oliveira da; FILHO, R. R. R. Torno cnc. **Revista Interface Tecnológica**, v. 19, n. 1, p. 313–326, 2022. Citado na página 15.
- SMID, P. **CNC Programming Handbook**. [S.l.]: INDUSTRIAL PRESS INC., 2003. Citado na página 17.
- SOUSA, V. F. C.; SILVA, F. J. G. Recent advances on coated milling tool technology—a comprehensive review. **Coatings**, v. 10, n. 3, p. 235, 2020. Citado na página 21.
- SZCZOTKARZ, N.; MRUGALSKI, R.; MARUDA, R. W.; KRÓLCZYK, G. M.; LEGUTKO, S.; LEKSYCKI, K.; DĘBOWSKI, D.; PRUNCU, C. I. Cutting tool wear in turning 316l stainless steel in the conditions of minimized lubrication. **Tribology International**, v. 156, p. 106813, 2021. Citado na página 21.
- ULTIMAKER. **pynest2d: Python bindings for libnest2d**. 2025. Acessado em abril de 2025. Disponível em: <<https://github.com/Ultimaker/pynest2d>>. Citado 5 vezes nas páginas 23, 24, 28, 30 e 33.