

Solicitações Mecânicas e Variações Térmicas provenientes do Processo de Usinagem

Otavio Ribeiro Reis

otavioribeiroreis@yahoo.com.br

Rodrigo Barbosa Ribeiro

rodrigobarbosar_@hotmail.com

Wallisson Amauri Chaves de Souza

wallissonamauri07@gmail.com

Professor Francisco Reginaldo da Rosa

Coordenação de Curso de Engenharia Mecânica

Resumo

A eficiência do processo é determinada pelo desempenho da usinagem, conhecendo os parâmetros de cortes ideais para o processo, proporciona uma redução de tempo e custos de manufatura e ainda otimiza a vida útil da ferramenta, sendo esta fundamental para manter a qualidade da peça e manter a tolerância dimensional de acordo com o especificado em desenho técnico para o produto final. Por meio de um estudo de levantamento bibliográfico e pesquisa prática aplicada à usinagem, este trabalho visa conhecer o comportamento e parâmetros do processo de fabricação por remoção de cavaco, identificando as variáveis que interferem consideravelmente nas altas solicitações térmicas e mecânicas a fim de adequar estas variáveis de modo a proporcionar menor desgaste ao inserto de corte. Alguns desses parâmetros, tais como a velocidade de avanço, velocidade de corte e profundidade de corte deve ser selecionados adequadamente, frente ao material da peça e da ferramenta a ser utilizada, bem como as condições de corte, para assim, não possa haver comprometimento na qualidade da peça e altos custos do processo.

Palavras-chave: Usinagem. Dados de Corte. Variações Térmicas. Esforços Mecânicos.

1. Introdução

O progresso deste trabalho consistirá na análise e obtenção de parâmetros ótimos do processo de usinagem de CNC (Controle Numérico Computadorizado), de modo a atingir uma maior eficácia na usinabilidade. O mercado está cada vez mais competitivo, com isso as empresas que dependem diretamente de operações de usinagem procuram, cada vez mais, oportunidades de melhorias em seus processos. A importância do aperfeiçoamento dos processos se dá para a manutenção da empresa no mercado, pois é possível ser mais competitiva, reduzindo-os tempos e custos. O processo de fabricação por usinagem faz parte da subárea da engenharia mecânica, onde possui inúmeras aplicações, dentro da indústria mecânica. Considerando a complexidade do processo, surgiu o interesse de se aprofundar no tema e conhecer as variáveis envolvidas no processo, como as solicitações térmicas e mecânicas, que afetam diretamente o desempenho na obtenção de peças usinadas.

No processo de usinagem temos a temperatura da interface cavaco-ferramenta

sendo influenciada pela velocidade de corte, haverá, portanto, limite prático na velocidade de corte, em cada par ferramenta-peça. As altas temperaturas nas ferramentas de cortes não só aceleram os mecanismos de desgaste termicamente ativados, como também reduzem o limite de escoamento delas (Machado e Da Silva, 1998).

É comum o desgaste do inserto no processo de usinagem devido ao atrito de ferramenta e peça, segundo Costa (2003), a vida útil da ferramenta pode ser comprometida por duas situações diferentes no movimento concordante.

Abordando os conceitos propostos por Ferraresi (1995), o fresamento apresenta dois tipos de movimentos denominados concordantes e discordantes, segundo o autor, no movimento concordante a ferramenta e a peça têm o mesmo sentido, em que o corte começa na espessura máxima do cavaco e termina no valor zero.

Este trabalho tem por objetivo conhecer de maneira mais aprofundada as variáveis mecânicas e térmicas envolvidas no processo de usinagem CNC, parâmetros estes que afetam diretamente a qualidade das peças produzidas e a vida útil da ferramenta. Pretende-se por meio da análise prática do processo de usinagem a CNC, conhecer as solicitações mecânicas e térmicas geradas no decorrer do processo. Devido à complexidade do processo, viu-se a necessidade de conhecer mais a fundo quais as variáveis que afetam a qualidade e desempenho do processo de usinagem.

2. Metodologia

O presente trabalho será composto por uma pesquisa experimental onde será abordado a teoria básica e os conceitos de usinagem, com objetivo de conhecer mais profundamente o comportamento da ferramenta no momento da usinagem. Após a revisão de bibliografia relacionada ao tema, serão realizados os experimentos com base na teoria apresentada no decorrer nos estudos do processo.

Na pesquisa experimental, serão analisadas variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definem-se as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto. A pesquisa experimental necessita de previsão de relações entre as variáveis a serem estudadas, como também o seu controle e, por isso, na maioria das situações, é inviável quando se trata de objetos sociais (GIL, 1996). O

trabalho de pesquisa por revisão bibliográfica que será abordada aqui utiliza material já publicado, constituído basicamente de livros, artigos de periódicos e, atualmente, de informações disponibilizadas na internet. Quase todos os estudos fazem uso do levantamento bibliográfico, e algumas pesquisas são desenvolvidas exclusivamente por fontes bibliográficas. Sua principal vantagem é possibilitar ao investigador a cobertura de uma gama de acontecimentos muito mais ampla do que aquela que poderia pesquisar diretamente (GIL, 2006).

O estudo será realizado por meios de experimentos utilizando máquina de usinagem CNC, no qual serão testados conceitos e parâmetros visando melhoria de processo e vida útil do ferramental.

Utilizando os fundamentos teóricos de usinagem, o experimento será testado em um Centro de Usinagem Haas modelo Vf2, trabalhando com os modelos de ferramenta padrão de mercado; Fresa de desbaste e acabamento com insertos intercambiáveis. Será avaliado forças atuantes no processo.

Os testes terão como base somente algumas variáveis, as quais são de suma importância nesse tipo de usinagem, como rotação da ferramenta de corte (rpm), velocidade de avanço e profundidade de corte. Objetivo será identificar quais dos três parâmetros têm mais influência no processo de usinagem com os diferentes modelos de ferramentas.

Os experimentos serão realizados a partir dos parâmetros padrões conforme os fornecedores de ferramentas. Estes parâmetros serão tomados como base para os próximos ensaios. O primeiro ensaio será realizado com base nas variações de RPM, segundo com base no avanço e terceiro com base na profundidade de corte, onde será avaliado a influência destes parâmetros individualmente nas forças atuantes no processo.

Através da ferramenta de desbaste, será calculado alguns parâmetros, utilizando as fórmulas da velocidade de corte, para seleção da rotação da ferramenta de corte e a fórmula de avanço para determinar o avanço dos eixos x e y. A profundidade de corte também é uma variável indicada pelo fornecedor.

Após os cálculos, os parâmetros são inseridos em um software CAM, para realização da programação da máquina. Por meio do software não é possível realizar a análise de esforço no processo de usinagem. Contando somente com a experiência profissional do próprio programador, tornando a análise pouco eficaz.

Portanto, o tema será de suma importância para buscar mais conhecimentos que pudessem fomentar melhor a escrita desse trabalho e sua fundamentação no contexto solicitações mecânicas e térmicas provenientes do processo de usinagem.

3. Referencial Teórico - Processo de Usinagem

Neste capítulo, é apresentado a fundamentação teórica a ser aplicada neste artigo. Inicialmente, são discutidos conceitos básicos de usinagem. Em seguida apresenta-se o que são suas variáveis e também o processo usinagem, CAD/CAM, entre outros assuntos relacionados ao conteúdo do trabalho.

3.1 Fundamentos básicos de usinagem

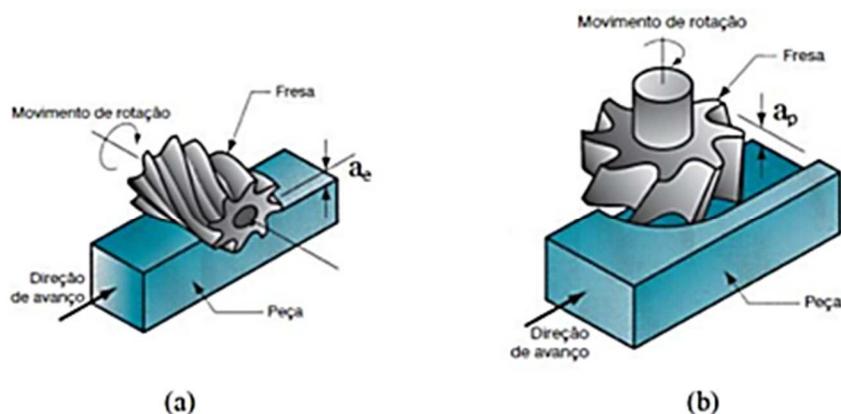
O processo de fabricação por remoção de material, ou usinagem, englobam todos os processos de fabricação que conferem forma, dimensões e acabamentos através da remoção de material da peça. Os processos de usinagens se classificam em convencionais e não convencionais. Dentre eles, o mais importante são os de usinagem convencional, nos quais uma ferramenta de corte afiada é utilizada para retirar mecanicamente o material, produzindo cavaco e obtendo assim a geometria desejada (GROOVER, 2014).

3.1.1 Fresamento

O fresamento se destaca como um dos processos mais úteis e versátil da usinagem convencional e pode ser utilizado tanto em operação de desbaste como de acabamento para obtenção das mais diversas e complexas geometrias. O fresamento é um processo em que uma ferramenta multicortante realiza o corte intermitente da superfície a ser usinada. A ferramenta fresa gira em torno do seu próprio eixo, enquanto a peça de trabalho é fixada na mesa da fresadora. O avanço, que se caracteriza pelo deslocamento relativo entre a ferramenta e a peça, ocorre devido a movimentação da ferramenta e/ou peça. Essa versatilidade permite a realização de diferentes operações e a usinagem de geometrias complexas. Devido ao movimento relativo entre a peça e a fresa, que está em rotação, o dente da ferramenta percorre uma trajetória torcional na superfície usinada gerando cavaco descontínuo e com espessura variável (ALTINTAS, 2000).

A operação de fresamento pode ser classificada como vertical, horizontal ou inclinada de acordo com a posição da fresa em relação ao componente que está sendo usinado. Já em relação às posições dos dentes da ferramenta, pode-se classificar o fresamento como tangencial ou frontal (GROOVER, 2014), conforme figura 1, a seguir.

Figura 1: Tipos de fresamento: (a) Tangencial, (b) Frontral.



Fonte: GROOVER (2014)

3.1.2 Fresamento CNC

Conhecendo o processo de fresamento convencional fica mais fácil de entender o CNC. O processo CNC é basicamente a comunicação de um computador com uma máquina de usinagem, temos como exemplo o centro de usinagem.

Os centros de usinagem são, na verdade, fresadoras às quais se juntaram outros sistemas mecânicos e eletrônicos, para obter uma máquina mais versátil.

Todo centro de usinagem tem um dispositivo conhecido como magazine de ferramentas. O magazine tem a função de alojar um certo número de ferramentas, o qual pode chegar a mais de uma dezena.

Os magazines constituem-se, normalmente, de um cabeçote giratório e de esteiras. O cabeçote giratório, também conhecido como torre ou revólver, comporta poucas ferramentas. As esteiras ou correntes arrastam os porta-ferramentas e comportam uma grande quantidade de ferramentas.

Para efetuar a troca da ferramenta que está no cabeçote por uma das que se encontram no magazine, é necessário um mecanismo conhecido como ATC, abreviação do termo, em inglês, *Automatic Tool Changer*, ou seja, trocador automático de ferramentas.

Os magazines e os ATCs possibilitam a troca automática de uma ferramenta por outra e aumentam a independência da máquina em relação à presença do operador humano. Uma mesma máquina pode fazer operações de fresamento, furação, mandrilamento, alargamento, rosqueamento etc., eliminando-se o tempo gasto na preparação de várias máquinas e o transporte do produto entre elas.

Assim, o produto fica pronto mais rapidamente e a um custo menor. Estes fatores podem ser decisivos para a sobrevivência da empresa, principalmente se for levada em conta a concorrência internacional à qual se encontram cada dia mais sujeitas. Abaixo, no quadro 1 e gráfico 1 são apresentados dados comparativos entre os tipos de processos de usinagem, no modo convencional e automático (TURCATO, 1997).

Os centros de usinagem, ao contrário das fresadoras CNC, são mais utilizados na produção de lotes médios e grandes de peças. Nesse caso, a tecnologia CNC, voltada para a flexibilidade, isto é, a produção de lotes médios de peças variadas, foge do tipo de aplicação para a qual foi criada (TURCATO, 1997).

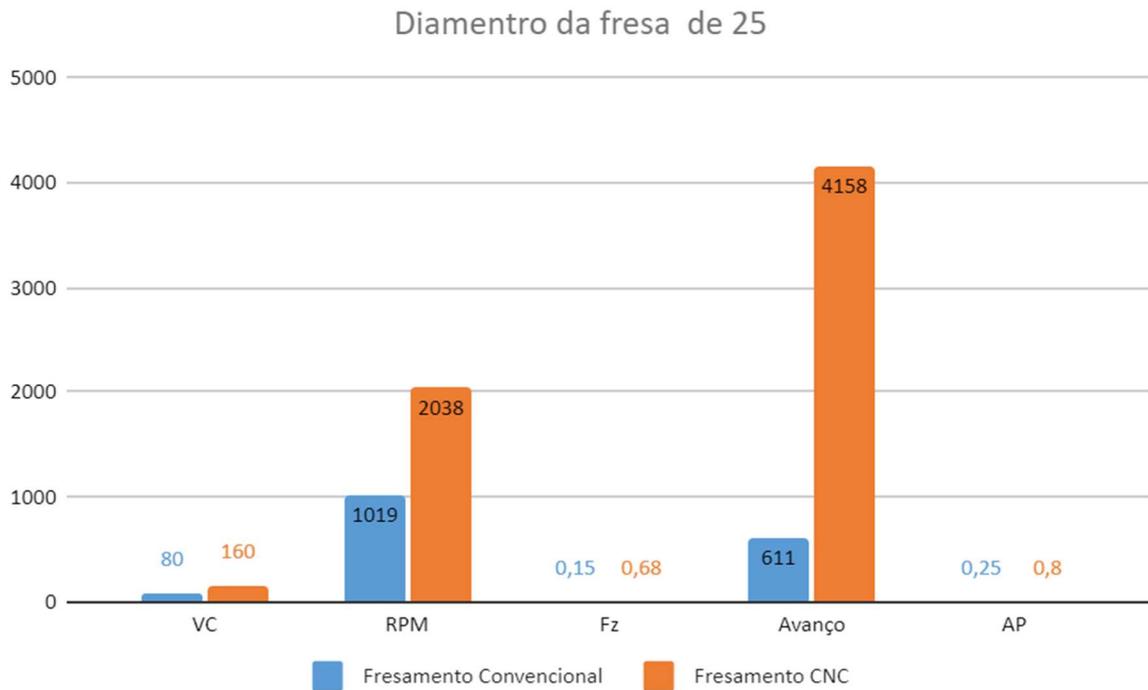
Quadro 1: Dados comparativos de parâmetros de corte na usinagem.

| | Fresamento Convencional | Fresamento CNC | |
|----------|-------------------------|----------------|------------------------------------|
| Material | Aço P20 | Aço P20 | |
| Ø Fresa | 25 - 4 Cortes | 25 - 4 Cortes | Vc = Velocidade de corte (m/min) |
| Vc | 80 | 160 | n = Rotação por minuto (RPM) |
| n | 1.019 | 2.038 | fz = Avanço (mm/gume corte) |
| fz | 0,15 | 0,68 | F = Velocidade de avanço (mm/min) |
| F | 611 | 4158 | ap = Profundidade corte (mm/passe) |
| ap | 0,25 | 0,8 | |

Fonte: Mitsubishi tools (2021).

Os dados foram obtidos de acordo com dados técnicos fornecidos pela Mitsubishi e esses não são os únicos parâmetros que determinam a velocidade de corte do material, temos dados de corte para materiais ferrosos e não ferrosos.

Gráfico 1: Comparativo de parâmetros de corte na usinagem, dados mencionados no quadro 1.



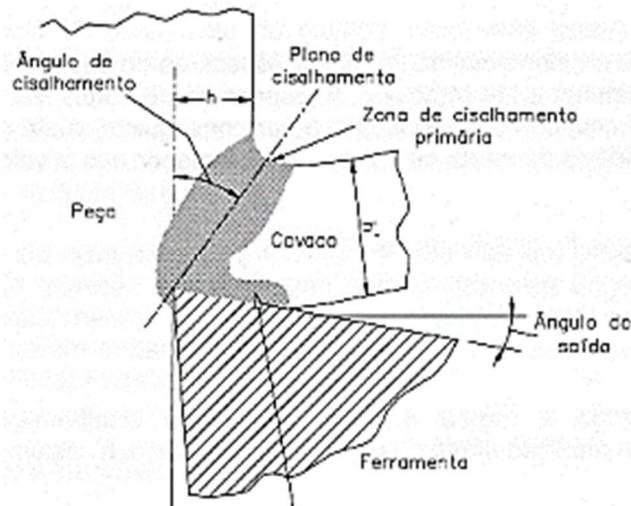
Fonte: Autor (2021)

3.2 Formação de cavaco

A formação de cavaco é um fenômeno que podemos considerar resíduos liberados da peça durante a usinagem. Um conhecimento de cavaco pode ser fundamental para o processo de usinagem, pois quanto menor o cavaco liberado durante a usinagem, maior será a economia. Com os avanços tecnológicos, a formação de cavaco está sendo cada vez mais eficaz no processo de usinagem, sendo coadjuvante para o desenvolvimento das arestas de corte, possibilitando usinar vários tipos de materiais (FERRARESI, 1977).

Na formação de cavaco, existe a cunha cortante, conforme figura 2, uma ferramenta que irá se penetrar em outro material, a cunha cortante são partes construtivas de uma ferramenta de corte, formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga.

Figura 2: Cunha cortante.



Fonte: Machado e Da Silva (2004).

No momento da penetração da cunha cortante o material passa por deformação elástica, uma deformação momentânea. Após essa deformação, ocorre a passagem para a deformação plástica, fazendo com que as tensões ultrapassem a limitações das resistências do material, até que essas tensões quebrem o material.

Após a ruptura do material, acontece a abertura de uma trinca, essa abertura da trinca depende muito das propriedades do material, como a ductilidade, fazendo com o que interfira no tipo de cavaco da peça (MACHADO E DA SILVA, 2004)

3.2.1 Tipos de cavacos

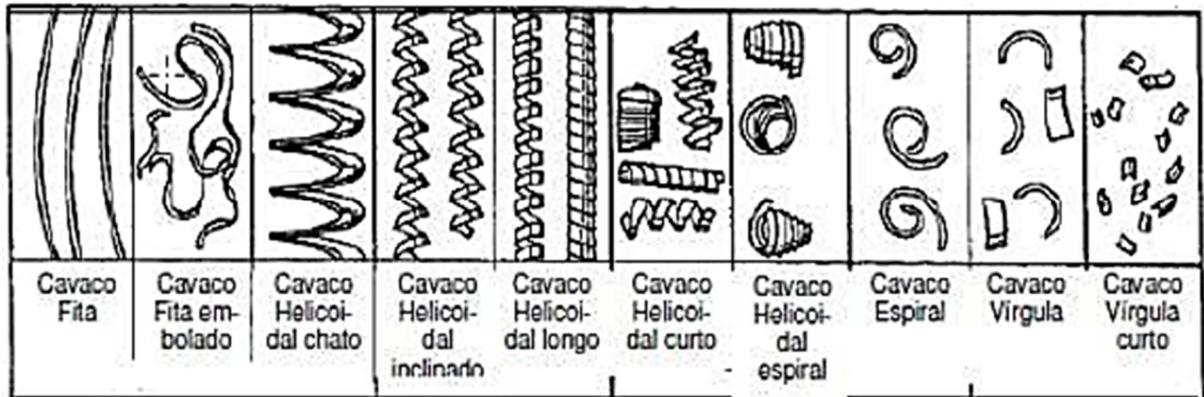
Os tipos de cavacos dependem muito da propriedade do material, se o material é mais dúctil ou menos dúctil. Temos o cavaco contínuo e o cavaco descontínuo, o cavaco contínuo acontece nos materiais mais dúcteis e o descontínuo ocorre nos menos dúcteis.

De acordo com Ferraresi (1977), a classificação mais comum dos cavacos quanto ao seu tipo é aquela citada tanto na literatura alemã como na americana (Schwerd, 1956; Sibel, 1995), e consiste em pelo menos três possibilidades: cavacos contínuos, cavacos de cisalhamento e cavaco de ruptura.

Entretanto, Machado e Da Silva (2004), apresentam uma classificação nos seguintes tipos: cavacos contínuos, cavaco parcialmente contínuo ou de

cisalhamento, cavaco descontínuo ou de ruptura e cavaco segmentado, veja a figura 3.

Figura 3: Tipos de cavacos.



Fonte: Wosniak (2011).

3.2.2 Cavaco Continuo

É um tipo de cavaco que são de materiais mais dúcteis, este tipo de cavaco ocorre porque o material não possui muito ponto de ruptura, ver figura 4. Trabalhar com velocidades mais altas, facilitam esse tipo de cavaco, ângulos mais altos e materiais resistentes.

Figura 4: Cavaco continuo.



Fonte: Childs et al (2000).

3.2.3 Cavaco Descontínuo

Forma-se na usinagem de materiais frágeis ou de estrutura heterogênea, ver Figura 5, há uma ruptura completa do material em grupos lamelares (na região de cisalhamento), os quais permanecem separados e é também denominado cavaco de ruptura (Ferraresi, 1977). Forma-se na usinagem de materiais frágeis ou de estrutura heterogênea, há uma ruptura completa do material em grupos lamelares (na região

de cisalhamento), os quais permanecem separados e é também denominado cavaco de ruptura (Ferraresi, 1977).

Figura 5: Cavaco descontínuo



Fonte: Childs et al (2000)

3.2.4 Cavaco de cisalhamento

Os cavacos segmentados são caracterizados por grandes deformações continuadas em estreitas bandas entre segmentos com pouquíssima, ou quase nenhuma deformação no interior destes segmentos (Machado e Da Silva,2004). Cook (1953) e Shaw et alli (1954), explicaram quantitativamente as características de segmentação dos cavacos.

3.3 Forças atuantes no processo de usinagem

A força é a interação de dois corpos ou de um corpo em seu ambiente, a força é medida pela aceleração que produz, a força resultante e a soma das forças individuais atuantes sobre um corpo (HELERBROCK, 2021).

A primeira lei de Newton, chamada lei da inércia, afirma que o princípio da inércia permanece em estado de repouso ou em movimento retilíneo uniforme quando as forças que atuam sobre ela são nulas (HELERBROCK, 2021).

As forças são uma grandeza capaz de vencer a inércia dos corpos, os movimentos são capazes de modificar o estado de movimento de um corpo causando a deformação (HELERBROCK).

A força é medida pela aceleração que produz, tendo um módulo de orientação, tendo duas forças atuando sobre um corpo podemos calcular a força total ou a força resultante somando vetorialmente as forças (HELERBROCK, 2021).

A inércia é uma propriedade de uma matéria na qual uma partícula com ausência de forças ou quando aplicada uma força resultante nula, permanece em equilíbrio (HELERBROCK, 2021).

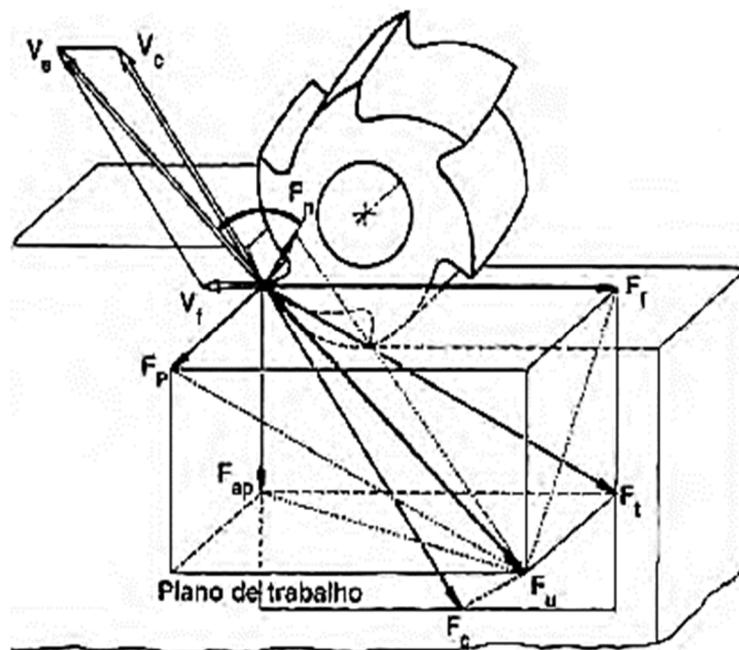
A segunda lei de Newton, trata-se das somas das forças atuantes nos corpos é igual ao produto do seu coeficiente da inércia pela aceleração (HELERBROCK, 2021).

A usinagem é um processo muito complexo, possui inúmeras variáveis que afetam diretamente o desempenho da ferramenta e a qualidade da peça (HELERBROCK, 2021).

Tais variáveis como, tipo de material, geometria do inserto, parâmetros de cortes, balanço da ferramenta e sistema de fixação da ferramenta, são fatores de suma importância para a estabilidade do processo, ambas as variáveis, são fatores responsáveis por gerar as componentes de forças do processo. (HELERBROCK).

É importante conhecer as componentes da força de usinagem, conforme figura 6, para que possa ser determinada as condições de cortes para que possamos conhecer a deformação da ferramenta, o desgaste é um critério de suma importância para o planejamento da usinabilidade de um determinado material. (FERRARESI, 1970).

Figura 6: Forças de corte no fresamento tangencial



Fonte: Ferraresi (1970).

Conhecendo as forças atuantes no processo, permite calcular a energia específica de corte que possui uma relação com a taxa de remoção e a potência de corte (KING; HAHN, 1986).

A variação de forças no processo de usinagem, são responsáveis por gerar a vibração causando a deflexão da ferramenta, fator que influencia diretamente no acabamento e tolerância dimensional da peça.

As vibrações podem ser geradas pelo excesso de parâmetros de cortes, haste de ferramentas finas, balanço da ferramenta fora do especificado, fixação irregular, insertos com geometria incorreta para a aplicação.

Um dos desafios da usinagem é saber estabilizar o processo de modo que produza mantendo a qualidade e a preservação da vida útil da ferramenta.

A usinagem de aço requer um conhecimento mais afundo da teoria da usinagem, os internos possuem diversas geometrias, dentre esses fatores, temos geometrias para cortes leves e para cortes pesados.

3.4 Variações térmicas no processo de usinagem

Dentre os vários fatores que afetam diretamente as condições de trabalho entre a ferramenta e a peça, a temperatura na ferramenta é um fator que limita bastante a produtividade das operações de usinagem, principalmente quando são desenvolvidas altas temperaturas durante o processo de corte às quais afetam fortemente o desempenho das ferramentas de corte, responsáveis em grande parte pela produtividade destas operações. Assim, um maior entendimento sobre o comportamento das temperaturas envolvidas na interface cavaco-ferramenta é de extrema importância para se fazer o correto dimensionamento e/ou seleção das ferramentas de corte empregadas no processo de usinagem.

Em usinagem as temperaturas máximas situam-se em regiões específicas, bem próximas à aresta de corte, onde as tensões atuantes (normais e cisalhantes) são altamente elevadas (Trent 1984).

Como no processo de torneamento apenas 8 a 10% do total de calor gerado é transferido para a ferramenta, a maior parte deste calor é dissipado pelo cavaco, mas uma pequena parcela é conduzida na peça, e aumenta a sua temperatura, podendo, às vezes, causar problemas de precisão dimensional (Machado e Da Silva, 1998).

Apesar desse pequeno percentual, as temperaturas podem atingir valores surpreendentemente elevados. A ferramenta funciona, então, como um sorvedouro

térmico. Isto é mais um agravante para a ferramenta podendo acelerar o desgaste nesta região.

4. Desenvolvimento, Resultados e Discussão

4.1 Desenvolvimento

O presente trabalho tem como objetivo conhecer as forças e as solicitações térmicas provenientes do processo de usinagem utilizando máquina CNC centro de usinagem Haas VF composta por 3 eixos equipada com carrossel de 20 ferramentas e com eixo árvore de 15.000 rpm, possui uma potência máxima de 24,4 kW.

Os testes foram executados em uma empresa no ramo de ferramentaria de moldes plásticos, foram utilizados um centro de usinagem Hass composto por 3 eixos, ferramentas de desbaste com inserto intercambiável com três arestas de cortes e raio de arestas de dois mm, também foi utilizado uma ferramenta de acabamento com inserto para cortes suaves com raio de canto de 0.5 mm.

Devido aos testes serem executados com duas ferramentas, foram utilizados dois corpos de prova de aço P20 com comprimento de 88 mm, largura de 30 mm e espessura de 40 mm.

Para a fixação do material foi utilizado uma morsa *superloock* composta por paralelos temperados, o material foi fixado utilizando uma área de fixação de 88 mm no comprimento e 20 mm.

O objetivo do teste foi identificar a temperatura gerada no processo de acordo com cada cálculo de força apresentado através de cálculos matemáticos.

Iniciamos os testes com os cálculos da força específica de corte KC, utilizando como constantes a profundidade de corte A_p em três faixas sendo 0,3 mm, 0,6mm e 0,9 mm, valores iguais para as duas ferramentas, desbaste e acabamento.

4.2 Resultados

O experimento realizado tratou de analisar o processo de fresamento, com variação de parâmetro e ferramental para se observar as variações de esforços e temperatura sobre o ferramental.

Para estudos do experimento foi utilizado o Centro de Usinagem Haas modelo Vf2, para realização dos ensaios foram especificados dois modelos de ferramentas, uma de desbaste e outra de acabamento, utilizando um corpo de prova de aço P20.

Teve como base os seguintes dados para calcular os parâmetros iniciais:

O parâmetro velocidade de corte, indica a velocidade de contato na qual a aresta usina a peça, deslocando a aresta de corte em direção à peça é expresso em metros por minuto (m/min). O deslocamento é medido pelo intervalo entre um dente, no momento em que a ferramenta entra em contato com a peça.

Os parâmetros do processo de usinagem, tais como: rotação de corte (rpm) e velocidade de avanço da ferramenta de corte são fundamentais para se obter as condições ideais para a operação. Estes são obtidos inicialmente em tabelas e catálogos de fabricantes de ferramentas e com a realização de cálculos por meio das seguintes fórmulas abaixo, e servirão de base para se obter as outras variáveis como a potência de corte.

- 1) **Rotação de Corte (n):** rotação ideal da ferramenta de corte para uma dada operação. Parâmetro influenciado pela velocidade de corte e diâmetro da ferramenta utilizada na usinagem (MITSUBISHI MATERIALS, 2021).

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \quad (\text{eq.1})$$

n: número de rotações (rpm) da ferramenta de corte.

V_c: Velocidade de corte da ferramenta de corte (m/min).

D: Diâmetro da ferramenta (mm).

- 2) **Velocidade de Avanço (V_f):** Esta variável consiste na obtenção da velocidade de deslocamento da mesa da máquina CNC, onde será fixada a peça a ser usinada, com base na rotação de corte calculada acima e no avanço por dente especificado em catálogo de fornecedor levando em consideração o quantidade de inserto utilizado no suporte (MITSUBISHI MATERIALS, 2021).

$$V_f = f_z \cdot z \cdot n \quad (\text{eq.2})$$

f_z: avanço por dente (mm/aresta cortante)

z: numero de insertos

n: rotação do eixo principal (rpm)

V_f: velocidade de Avanço (mm/min)

O cálculo de força de corte e de potência de corte são cálculos com base nas

solicitações mecânicas, é possível conhecer a força de corte gerada no processo e o conhecimento da potência de corte gerada no decorrer da usinagem.

- 3) **Força de corte (Ft):** Esta variável força de corte serve para calcular a força atuante no decorrer da usinagem tendo como base para o cálculo a profundidade de corte e o avanço por dente (MITSUBISHI MATERIALS, 2021).

$$Ft = Kc \cdot ap \cdot fn \quad (\text{eq.3})$$

Kc: coeficiente de força específica (MPa) - Tabela 1

ap: profundidade de corte (mm)

fn: avanço por dente (mm/dente)

Tabela 1: Coeficiente de força específica Kc.

| Material | Resistência à Tração e Dureza (MPa) | Coeficiente de Força Específica Kc (MPa) | | | | |
|---|-------------------------------------|--|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | 0.1 (mm/dente) | 0.2 (mm/dente) | 0.3 (mm/dente) | 0.4 (mm/dente) | 0.6 (mm/dente) |
| Aço Baixo Carbono (com ligas especiais) | 520 | 2200 | 1950 | 1820 | 1700 | 1580 |
| Aço Baixo Carbono | 620 | 1980 | 1800 | 1730 | 1600 | 1570 |
| Aço Duro | 720 | 2520 | 2200 | 2040 | 1850 | 1740 |
| Aço Ferramenta | 670 | 1980 | 1800 | 1730 | 1700 | 1600 |
| Aço Ferramenta | 770 | 2030 | 1800 | 1750 | 1700 | 1580 |
| Aço Cromo-Manganês | 770 | 2300 | 2000 | 1880 | 1750 | 1660 |
| Aço Cromo-Manganês | 630 | 2750 | 2300 | 2060 | 1800 | 1780 |
| Aço Cromo-Molibdênio | 730 | 2540 | 2250 | 2140 | 2000 | 1800 |
| Aço Cromo-Molibdênio | 600 | 2180 | 2000 | 1860 | 1800 | 1670 |
| Aço Níquel Cromo-Molibdênio | 940 | 2000 | 1800 | 1680 | 1600 | 1500 |
| Aço Níquel Cromo-Molibdênio | 352HB | 2100 | 1900 | 1760 | 1700 | 1530 |
| Aço Inoxidável Austenítico | 155HB | 2030 | 1970 | 1900 | 1770 | 1710 |
| Ferro Fundido | 520 | 2800 | 2500 | 2320 | 2200 | 2040 |
| Ferro Fundido Meehanite | 46HRC | 3000 | 2700 | 2500 | 2400 | 2200 |
| Ferro Fundido Duro | 360 | 2180 | 2000 | 1750 | 1600 | 1470 |
| Ferro Fundido Cinzento | 200HB | 1750 | 1400 | 1240 | 1050 | 970 |
| Latão | 500 | 1150 | 950 | 800 | 700 | 630 |
| Ligas Leves (Al-Mg) | 160 | 580 | 480 | 400 | 350 | 320 |
| Ligas Leves (Al-Si) | 200 | 700 | 600 | 490 | 450 | 390 |
| Ligas Leves (Al-Zn-Mg-Cu) | 570 | 880 | 840 | 840 | 810 | 720 |

Fonte: Mitsubishi Materials (2021)

4) **Potência de corte (Nc):** Esta variável de potência de corte é para determinar a potência a ser utilizado no processo de usinagem, tendo como base a profundidade de corte, largura do corte e avanço de deslocamento da mesa.

$$P_C = \frac{ap \cdot ae \cdot vf \cdot kc}{60 \cdot 10^6 \cdot n} \quad (\text{eq.4})$$

ap: profundidade de corte (mm)

ae: largura de corte (mm)

vf: avanço da mesa (mm/min)

kc: coeficiente de força específica (MPa) - Tabela 1

n: coeficiente da eficiência da máquina(%)

Experimento 1:

O primeiro ensaio foi com a ferramenta de desbaste com as seguintes características; ferramenta de inserto intercambiável com 3 cortes, possuindo diâmetro de 25,0 mm, inserto classe P para usinagem de aço liga.

O experimento de desbaste foi realizado com os seguintes parâmetros:

- Vc = 150 m/min;
- Fz = 0,66 mm/dente;
- n = 1911 rpm;
- Vf = 3783 mm/min;
- ap mínima: 0,3 mm/passe;
- ap máxima: 0,6 mm/passe.

Tabela 2 : Força Específica de corte (Ft) - Inserto Desbaste (Aço P20)

| Força Específica de Corte - Inserto Desbaste (Aço P20) | | | | | | | | | | | |
|--|-----|------|-------|--------|-------------------|---------|-----------|-----------|--------|----------------|----------------|
| KC | AP | Fz | Ft | | Potência Corte PC | Rebaixo | T Inicial | T Inserto | T Peça | T Pico Contato | Tempo Usinagem |
| 1.600 | 0,3 | 0,66 | 316,8 | Newton | 0,13 | 5 | 24° | 28° | 25° | 38° | 02:30 |
| 1.600 | 0,6 | 0,66 | 633,6 | Newton | 0,26 | 5 | 24° | 35° | 27° | 46° | 02:20 |
| 1.600 | 0,9 | 0,66 | 950,4 | Newton | 0,38 | 5 | 24° | 43° | 29° | 50° | 02:00 |

Fonte: Autor (2021).

Conforme dados da tabela 2, foi realizado teste como dois parâmetros diferentes, no primeiro experimento trabalhamos com um parâmetro onde foi utilizado: ap = 0,3 mm, gerou uma força de 316 N, a ferramenta permaneceu em contato com

o material durante 2 min e 30s obtivemos temperatura de pico de 38°C no momento em que a ferramenta estava trabalhando.

Assim que terminou a usinagem, com auxílio do termômetro a laser, foram coletadas as temperaturas da peça e do inserto, foi notado que o inserto teve a temperatura mais alta (28°C) do que a peça.

Experimento 2:

No segundo experimento foi analisado um parâmetro superior ao primeiro com as seguintes configurações: ap 0,6 mm, gerou uma força calculada de corte de 633,6N. A ferramenta permaneceu em contato com o material durante 2min e 20s e obteve-se temperatura de pico de 46°C.

No segundo teste, também foi notado que o inserto teve a temperatura mais alta (35 °C) que a peça.

O desbaste gerou forças de corte mais elevadas devido a geometria do inserto e do raio de canto das arestas, os raios deixam a ferramenta mais robusta, permitindo trabalhar com avanços mais elevados.

Durante os experimentos 1 e 2 houve um desgaste por entalhe velocidade de corte muito alta ou resistência ao desgaste insuficiente nos inserto como podemos observar a figura 7.

Figura 7: Fresa de desbaste 3 cortes.



Fonte: Autor (2021).

Experimento 3:

O terceiro ensaio foi com a ferramenta de acabamento com as seguintes características; ferramenta de inserto com 2 cortes, diâmetro de 16,0 mm, inserto classe P para usinagem de aço liga.

O experimento de Acabamento foi realizado com os seguintes parâmetros:

- $V_c = 185$ m/min;
- $F_z = 0,10$ mm/dente;
- $n = 3682$ rpm;
- Numero de dentes: 2;
- $V_f = 736$ mm/min;
- a_p minima: 0,3 mm/passe;
- a_p maxima: 0,6 mm/passe.

Tabela 3: Força específica de corte (F_t) - inserto Acabamento (Aço P20).

| Força Especifica de Corte - Inserto Acabamento (Aço P20) | | | | | | | | | | | |
|--|-----|-----|-------|--------|-------------------|---------|-----------|-----------|--------|----------------|----------------|
| KC | AP | Fz | Ft | | Potência Corte PC | Rebaixo | T Inicial | T Inserto | T Peça | T Pico Contato | Tempo Usinagem |
| 1.980 | 0,3 | 0,1 | 59,4 | Newton | 0,16 | 5 | 24° | 30° | 28° | 27° | 09:07 |
| 1.980 | 0,6 | 0,1 | 118,8 | Newton | 0,31 | 5 | 24° | 40° | 32° | 35° | 04:48 |
| 1.980 | 0,9 | 0,1 | 178,2 | Newton | 0,47 | 5 | 24° | 56° | 40° | 48° | 03:12 |

Fonte: Autor (2021).

Conforme dados da tabela 3, foi realizado teste com dois parâmetros diferentes, no primeiro experimento trabalhamos com um parâmetro onde foi utilizado: a_p de 0,3 mm/passe; F_z de 0,1 mm/dente; f_t de 59,4 N; p_c de 0,16 Kw; o ferramental permaneceu em contato com o material durante 9 minutos e 07 segundos obtive-se temperatura de pico de 27°C.

Experimento 4:

No quarto experimento foi analisado um parâmetro superior ao primeiro com as seguintes configurações: a_p de 0,6 mm/passe; f_z de 0,1 mm/dente; f_t de 118,8N; p_c de 0,31 Kw. O ferramental permaneceu em contato com o material durante 4 minutos e 48 segundos e obtive-se temperatura de pico de 35°C.

Durante os experimentos 3 e 4 houve um desgaste por craterização que ocorre quando temos a temperatura de corte muito alta nos inserts, como pode-se observar a figura 8.

Figura 8: Fresa de acabamento 2 cortes.

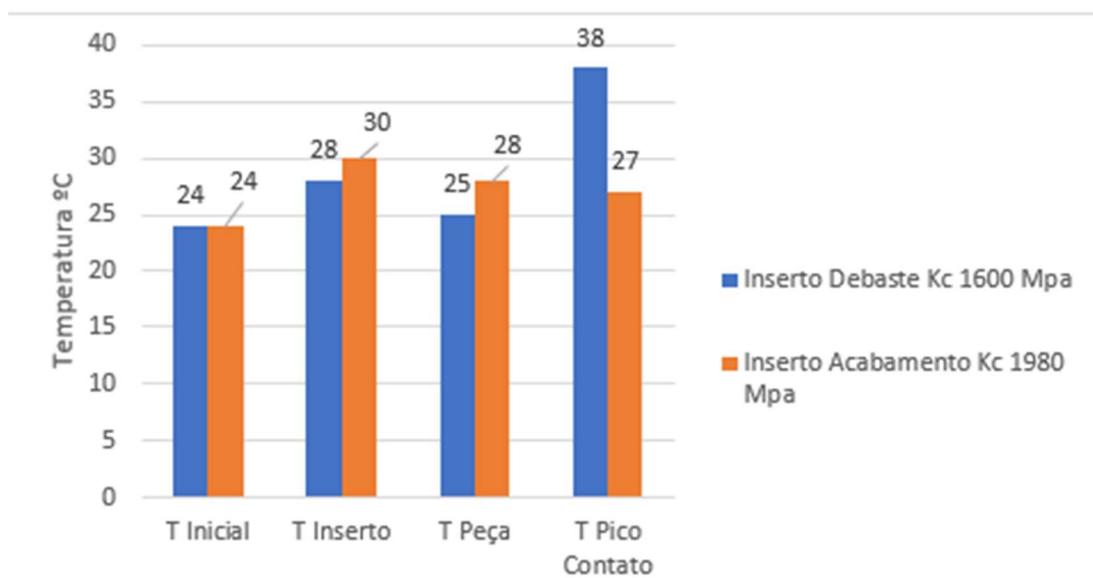


Fonte: Autor (2021).

4.2 Discussões

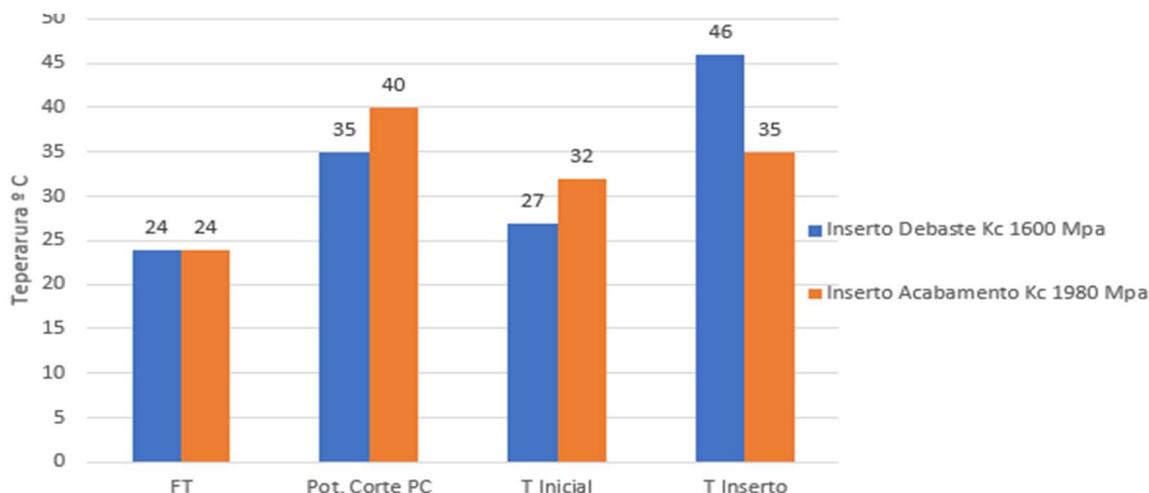
Foram gerados os gráficos 2, 3 e 4, onde são demonstrados a comparação da temperatura no inserto com diferentes potências.

Gráfico 2: Gráfico comparativo de temperatura do inserto, com potência de corte de 0,16 kW para acabamento e 0,13 kW para desbaste.



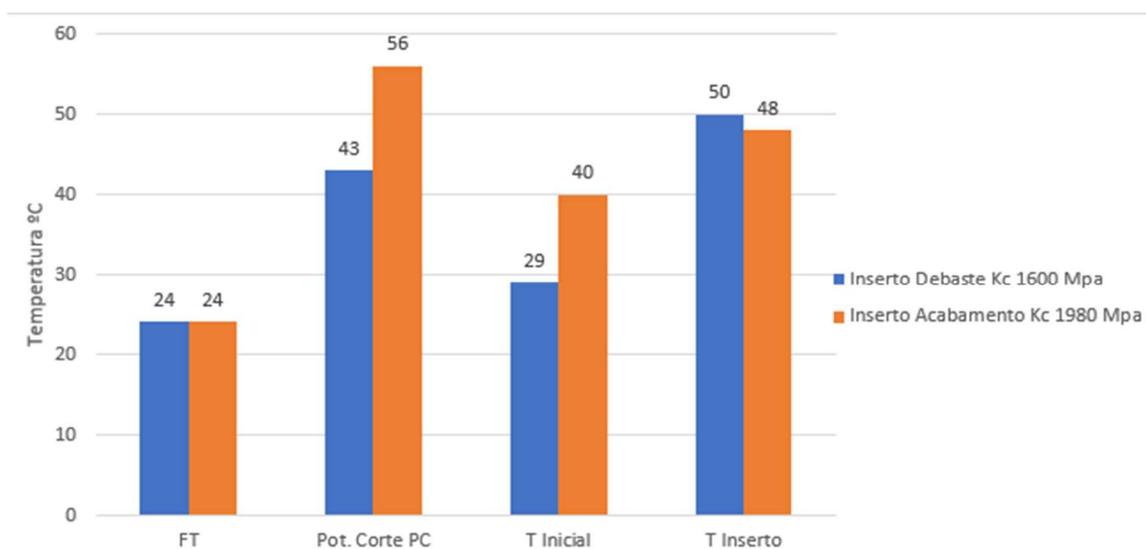
Fonte: Autor (2021)

Gráfico 3: Gráfico comparativo de temperatura do inserto, com potência de corte de 0,31 kW para acabamento e 0,26 kW para desbaste



Fonte: Autor (2021)

Gráfico 4: Gráfico comparativo de temperatura do inserto, com potência de corte de 0,47 kW para acabamento e 0,38 kW para desbaste.



Fonte: Autor (2021)

Durante a realização dos experimentos de desbaste observamos que devido a alta taxa de avanço exigiu uma força de corte maior, conseqüentemente o tempo de permanência de contato entre ferramenta e peça e menos gerando menos atrito e baixa temperatura.

No experimento de acabamento observamos que devido a taxa de avanço ser menor exige menos força de corte gerando uma maior permanência de atrito entre ferramenta e peça, ocasionando em maior temperatura de contato.

Conclusão

Foram realizados testes práticos utilizando máquina CNC centro de usinagem Haas, com objetivo de testar na prática os parâmetros obtidos em cálculos conforme apresentados nas equações de 1 a 4.

Após obter os resultados das equações, os valores obtidos foram inseridos na programação da máquina CNC e em seguida executados usinado dois corpos de provas, sendo um para o desbaste e outro para o acabamento.

De acordo com os resultados apresentados na usinagem de desbaste e acabamento, notamos que o desbaste possui avanços maiores, possui forças de cortes maiores gerando menor temperatura, isso acontece devido a velocidade em que a mesa se desloca, gerando menor atrito entre ferramenta e peça. Esses resultados se apresentaram realizando estes ensaios em corpo de prova (peça de trabalho) de aço liga P20. Porém a aplicação desse método pode-se aplicar a outros materiais, de modo a verificar como serão os comportamentos de força e temperatura no decorrer do processo de usinagem variando-se os tipos de materiais de confecção da peça de trabalho.

O acabamento possui avanços mais baixos gerando menor força de corte aumentando o atrito entre ferramenta e peça devido a mesa da máquina se deslocar mais lentamente, a ferramenta permanece mais tempo em contato com a peça gerando maiores temperaturas nos insertos e nos cavacos. Percebeu-se também que os insertos e os cavacos possuem maior temperatura que a própria peça usinada. As temperaturas são variáveis que podem afetar o dimensional da peça gerando dilatação, e comprometendo a vida útil dos insetos.

No mesmo percebe-se que a rotação de corte influencia no processo de acabamento e vida útil da ferramenta sem alterar o tempo de usinagem.

Os avanços e a profundidade de corte são influenciados no tempo de usinagem e na vida útil da ferramenta, comprometendo a força de corte e gerando temperaturas.

O objetivo da combinação correta dos parâmetros de corte resulta em maior vida útil da ferramenta, possibilitando reduzir os desgastes prematuros dos insertos reduzindo os custos de usinagem.

Concluimos que a força de corte de um determinado material está relacionada com o coeficiente de força específica de cada material (K_c), para a obtenção da força a ser gerada no decorrer da usinagem, é necessário especificar a profundidade de corte (a_p) e o avanço por dente (f_z).

Referente às solicitações térmicas notamos que está mais associada a baixa taxa de avanço e o tempo de permanência em contato com a peça a ser usinada.

De acordo com os dados obtidos, para os futuros experimentos deixa-se como proposta identificar qual os parâmetros ideais de cortes para aumento do volume de remoção de cavacos, de modo a obter alta produtividade nos processos de usinagem.

Referências Bibliográficas

ALTINTAS, Y. **Manufacturing automation - metal cutting mechanics, machine tool vibration and CNC design**. United Kingdom: Cambridge University Press, 2000.

COOK, N. H. **Chip formation in Machining Titanium**. Massachussets. 1953.

COSTA, A. R. **Otimização do processo de fresamento de cavidades com fresas de insertos intercambiáveis**. 2003. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP, Campinas.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 9. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1995.

FERRARESI, D., 1977, “**Fundamentos da Usinagem dos Metais**”, Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo.

GOROVER, M. P. **Introdução aos Processos de fabricação**. 1. ed [s.1] LTC Editora, 2014.

HELERBROCK, Rafael. **Leis de Newton**. *Brasil Escola*. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/leis-newton.htm>. Acesso em 08 de dezembro de 2021.

KING, R. I; HAHN, R. S. Principles of grinding. In: ___. **Handbook of modern grinding technology**. EUA: Ghapman and Hall, 1986. p. 30-71.

MACHACO, A. R.; Da silva, M.B. **Usinagem dos Metais**. Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem. Editora UFU. Universidade Federal de Uberlândia. 2004. p.266

MACHADO, A.R e DA SILVA, M.B. **Usinagem dos Metais**. Apostila. Universidade Federal de Uberlândia. EDUFU. 1998.

Mitsubishi Materials. Disponível em: <http://www.mnbr-carbide.com.br/technical_information/tec_rotating_tools/tec_rotating_insert/tec_rotating_insert_formula_top/tec_milling_power_formula> Acesso em: 03 NOV 2021.

SCHWERD, F. **Spanend Werkzeugmaschinen**. Berlin. 1956.

SIBEL, E. **Handbuch der Werkstoffprüfung**, Berlin. 1955.

TORCANO, **Fresamento com CNC**. Disponível em: <<https://essel.com.br/cursos/material/01/ProcessosFabricacao/53proc3.pdf>> Acesso em 03 NOV 2021.

TRENT, E.M. **Metal Cutting**. Second Edition. Butterworth. England. 1984. 245 p.

WOSNIAK, Fabio Augusto. **Análise do Processo de Furação Profunda no Aço AISI 4150**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2011.