

AUGUSTO CÉSAR SANTOS PEIXOTO

**SIMULAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE
USINAGEM NO FRESAMENTO DE TOPO DO INCONEL 718
E VALIDAÇÃO COM RESULTADOS EXPERIMENTAIS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2019

AUGUSTO CÉSAR SANTOS PEIXOTO

**SIMULAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE
USINAGEM NO FRESAMENTO DE TOPO DO INCONEL 718
E VALIDAÇÃO COM RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

Projeto de fim de curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador(es): Dr. Wisley Falco Sales.

UBERLÂNDIA – MG
2019

AUGUSTO CÉSAR SANTOS PEIXOTO

**SIMULAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE
USINAGEM NO FRESAMENTO DE TOPO DO INCONEL 718
E VALIDAÇÃO COM RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

Projeto de fim de curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Prof. Dr. Wisley Falco Sales – UFU

Prof. Dr. Roberto de Souza Martins – UFU

Prof. MSc. Leonardo Rosa Ribeiro da Silva – UFU

UBERLÂNDIA – MG
2019

AGRADECIMENTOS

À minha mãe e irmãos, pelo incentivo e apoio incondicional.

À minha namorada pelo amor e incentivo.

Ao meu amigo Felipe dos Anjos pelo apoio no trabalho e companheirismo.

Ao Prof. Dr. Wisley Falco Sales pela sua determinação para a realização do meu trabalho, suas correções e incentivos.

Ao Prof. MSc. Leonardo Rosa Ribeiro da Silva pelo apoio na pesquisa e pela sua vontade ímpar em ajudar os alunos.

Ao Prof. Dr. Roberto de Souza Martins pela compreensão e disponibilidade de participar da minha banca mesmo com o prazo apertado.

À UFU e ao LEPU pela excelente infraestrutura laboratorial, que proporcionou a realização deste trabalho.

À todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

SANTOS PEIXOTO, A. C. **SIMULAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE USINAGEM NO FRESAMENTO DE TOPO DO INCONEL® 718 E VALIDAÇÃO COM RESULTADOS EXPERIMENTAIS.** 2019. 39 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

Em virtude de suas excelentes propriedades mecânicas à alta temperatura, o Inconel® 718 é largamente empregado em componentes aeronáuticos, componentes de compressores, na indústria automobilística, entre outras. Essa liga caracteriza-se pela sua baixa usinabilidade, possui baixa condutividade térmica e apresenta encruamento quando submetido a esforços de usinagem. A partir destas informações, este trabalho propõe-se a desenvolver um modelo computacional 2D em elementos finitos, utilizando o pacote Advantedge®, a fim de estudar a influência da variação dos parâmetros de usinagem no consumo energético da máquina-ferramenta e na temperatura da ponta da fresa durante o processo. O modelo consiste em uma amostra de o Inconel® 718 com dureza de 450HV, que sofre o arranque de cavaco por uma única rotação de um dente da fresa sobre o material. Alterou-se a velocidade de corte da fresa para valores de 15mm/min e 75mm/min; e para o avanço simulou-se 0,016mm e 0,031mm por dente. Os resultados de temperatura e de potência apresentaram correlação direta com as condições de corte.

Palavras chave: Inconel® 718, fresamento de topo, método de elementos finitos.

SANTOS PEIXOTO, A. C. **SIMULATION OF THE INFLUENCE OF MACHINING PARAMETERS IN INCONEL® 718 TOP MILLING AND VALIDATION WITH EXPERIMENTAL RESULTS.** 2019. 39 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

Due to its excellent mechanical properties at high temperature, Inconel® 718 is widely used in aeronautical components, compressor components, automotive industry, among others. This alloy characterized by its low machinability, has low thermal conductivity and presents hardening when subjected to machining efforts. From this information, this work proposes to develop a 2D computational model in finite elements, using the Advantedge® package, in order to study the influence of the variation of the machining parameters on the power consumption of the machine tool and the tip temperature during the process. The model consists of a sample of Inconel® 718 with a hardness of 450HV, which suffers the chip start by a single rotation of a tooth of the milling cutter on the material. The cutter speed was changed to values of 15 mm/min and 75 mm/min; and for the advance simulated 0.016mm and 0.031mm per tooth. The results of temperature and power showed a direct correlation with the cutting conditions

Keywords: Inconel® 718, end milling, finite element method.

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ρ	Densidade [Kg/m ³]
a_e	Espessura de penetração [mm]
a_p	Profundidade de corte [mm]
Cr	Cromo
D	Diâmetro da fresa [mm]
f	Avanço [mm]
F_{ap}	Força apoio [N]
F_c	Força de corte [N]
F_f	Força de avanço [N]
F_n	Força de compressão [N]
F_p	Força de profundidade [N]
F_T	Força ativa [N]
F_u	Força de usinagem [N]
f_e	Avanço efetivo de corte [mm]
f_z	Avanço por dente [mm]
LEPU	Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem
n	Rotação da fresa [rpm]
Ni	Níquel
K_s	Coefficiente de pressão específica de corte [MPa]
P_c	Potência de corte efetiva [kW]
v_c	Velocidade de corte [mm/min]
v_f	Velocidade de avanço [mm/min]
v_e	Velocidade de efetiva de corte [mm/min]
Z	Número de dentes

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Condições de usinagem ensaios de Favero-Filho _____	26
Tabela 2: Resultados obtidos numericamente via simulação no Advantedge® _____	32
Tabela 3: Resultados obtidos experimentalmente feitos por Favero-Filho (2018) _____	33
Tabela 4: Erros relativos _____	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Centro de fresamento CNC. _____	12
Figura 2: Fresamento tangencial e fresamento frontal. _____	13
Figura 3: Avanço por dente (fz) e avanço efetivo (fe) no fresamento. _____	14
Figura 4: Velocidade de corte (vc), velocidade de avanço (vf), velocidade efetiva (ve) no fresamento. _____	15
Figura 5: Profundidade de corte (ap) e espessura de penetração (ae). _____	15
Figura 6: Fresa de topo com insertos intercambiáveis. _____	16
Figura 7: Fresa de topo integral. _____	17
Figura 8: Características da fresa de topo. _____	17
Figura 9: Micro fresa HRC55 Carboneto de Tungstênio. _____	18
Figura 10: Fresamento discordante e concordante _____	18
Figura 11: Componentes da força de usinagem no fresamento. _____	19
Figura 12: Utilização de Inconel® 718 na indústria. _____	22
Figura 13: Malha de elementos finitos 2D _____	23
Figura 14: Refinamento da malha: (I) grosseiro (II) intermediário (III) refinado. _____	24
Figura 15: Modelo de fresamento de topo, análise 2D. _____	26
Figura 16: Seleção do material da peça. _____	27
Figura 17: Ferramenta utilizada nos ensaios do Favero-Filho, montada no suporte. _____	27
Figura 18: Caracterização da geometria da fresa de topo. _____	28
Figura 19: Parâmetros do processo de fresamento. _____	28
Figura 21: Refinamento da malha na região do contato peça-ferramenta. _____	30
Figura 22: Condição A: velocidade de corte 15m/min e avanço de 0,016mm por dente. ____	31
Figura 23: Condição A: velocidade de corte 15m/min e avanço de 0,016mm por dente. ____	31
Figura 24: Condição B: velocidade de corte 15m/min e avanço de 0,031mm por dente. ____	32

Sumário

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVO	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1 Fresamento	12
3.1.1 Características e parâmetros do processo	13
3.1.2 Fresa de Topo	15
3.1.3 Direção concordante e discordante de corte	18
3.1.4 Potência de usinagem no fresamento de topo	19
3.2 Inconel® 718	21
3.3 Método dos Elementos Finitos	22
3.3.1 Modelagem da deformação	24
3.3.2 Modelagem da temperatura	25
4. METODOLOGIA	26
5. RESULTADOS E DISCUSÕES	30
5.1 Visualização das tensões plásticas e formação do cavaco	30
5.2 Comparação dos resultados	32
6. CONCLUSÃO	35
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

1. INTRODUÇÃO

Para aplicações de trabalho a altas temperaturas, o desenvolvimento de materiais que a liam propriedades mecânicas (resistência mecânica) e metalúrgicas (resistência à corrosão/oxidação) vem sendo estudados desde a Revolução Industrial (SANTOS-JÚNIOR, 2011). A partir da metade do século passado as ligas de níquel começaram a ganhar espaço em diversas aplicações industriais devido à combinação de boa resistência à fadiga e à fluência, bem como ductilidade e rigidez, mesmo em aplicações com altas temperaturas. Inicialmente empregadas na indústria aeroespacial para a fabricação de peças de turbinas e compressores, rapidamente passaram a também estar presentes em peças das indústrias petroquímicas, automobilística e nos setores médico, químico, entre outros (SANTOS-JÚNIOR, 2011).

Porém, a usinabilidade destas superligas de níquel é um grande desafio para a indústria metalomecânica, pois, devido à sua baixa condutividade térmica, é recorrente a formação de encruamento quando submetido aos esforços de usinagem. Tais ligas também apresentam alta afinidade química com muitos materiais de ferramentas de corte (SUGAHARA, 2012). Dessa forma, há uma grande área de estudo que busca avaliar condições de usinagem adequadas que aliam ganho de produtividade e a qualidade das peças produzidas para essas ligas de níquel.

Dentre as técnicas analíticas de estudo está a simulação modelos que resolvem de forma aproximada as equações que regem o processo de fabricação. E atualmente, uma das melhores ferramentas para a simulação de variados problemas de engenharia, tais como, processos de fabricação, mecânica dos sólidos, transferência de calor, mecânica dos fluidos, análise estrutural, entre outros é o Método dos Elementos Finitos, (REDDY, 2006).

Este trabalho de conclusão de curso está dividido em seis seções, descritas a seguir:

- Introdução – seção atual, onde foi introduzido de forma sucinta o tema do trabalho e sua estruturação.
- Objetivo – descrição concisa do propósito do trabalho.
- Revisão bibliográfica – seção que abordará os conhecimentos teóricos necessários para desenvolvimento desse trabalho.
- Metodologia – descrição dos procedimentos adotados para a realização das simulações seguindo os parâmetros utilizados em ensaios experimentais da dissertação de mestrado de Favero-Filho(2018).

- Resultados e discussão – apresentará os resultados encontrados e as discussões sobre os mesmos.
- Conclusões – mostrará a partir dos resultados obtidos as conclusões do trabalho e irá expor as sugestões para trabalhos futuros.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um modelo computacional 2D em elementos finitos, utilizando o software Advantedge®, a fim de analisar a influência da variação dos parâmetros de usinagem na potência requerida pela máquina-ferramenta e na temperatura da ponta da fresa durante o processo de fresamento de topo de uma peça de Inconel® 718.

Como objetivos específicos têm-se:

- Simular o modelo para três condições de usinagens diferentes, onde os parâmetros de velocidade de corte e o avanço da ferramenta variaram.
- Comparar os resultados obtidos via recurso computacional com os resultados experimentais expostos por Favero-Filho(2018).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Fresamento

O fresamento é um processo de usinagem caracterizado pelo arranque de cavaco provocado por uma ferramenta que apresenta uma ou múltiplas arestas cortantes que giram ao redor de seu eixo central. Tais arestas de corte estão simetricamente dispostas em torno do eixo central, de modo que a cada rotação da ferramenta uma pequena quantidade de material é removida por cada aresta cortante. Na maioria dos processos de fresamento a direção de movimento de avanço é perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta, em outras palavras, a ferramenta com múltiplas arestas de corte, executa o movimento de rotação enquanto a mesa do equipamento avança com peça pressionando-a contra a fresa, conferindo ao material a forma e dimensões desejadas.

O processo de fresamento é bastante flexível, há uma vasta diversidade de tipos de ferramentas que aliada à liberdade de movimento tanto da mesa quanto da fresa possibilita a produção de ampla variedade de superfícies planas ou curvas, ranhuras, ressaltos, roscas, engrenagens e outras configurações (DINIZ, 2006).

Em um centro de usinagem CNC, como mostrado na Figura 1, além da alta variedade de formas que podem ser produzidas, alia duas vantagens para a indústria mecânica que são: a possibilidade de obtenção de excelente acabamento superficial e a alta taxa de remoção de material garantindo alta produtividade. (STEMMER, 1995).



Figura 1: Centro de fresamento CNC.

Fonte: Disponível em <<http://www.usimais.com>>, acessado em 20/01/2019.

Conforme Diniz (2006), a partir da disposição do eixo de rotação da ferramenta, classifica-se a operação de fresamento da seguinte maneira:

- Fresamento tangencial: O eixo da fresa está disposto paralelamente à superfície da peça, de forma que as arestas de corte estão posicionadas na periferia da parte cilíndrica. As ferramentas são nomeadas de fresas cilíndricas ou tangenciais.
- Fresamento frontal (de topo): O eixo da fresa está disposto perpendicularmente à superfície da peça, de forma que dentes ativos estão na superfície frontal da ferramenta. As ferramentas são nomeadas de fresas de topo ou frontais. Na Figura 2, está esquematizado os dois tipos de fresamento.

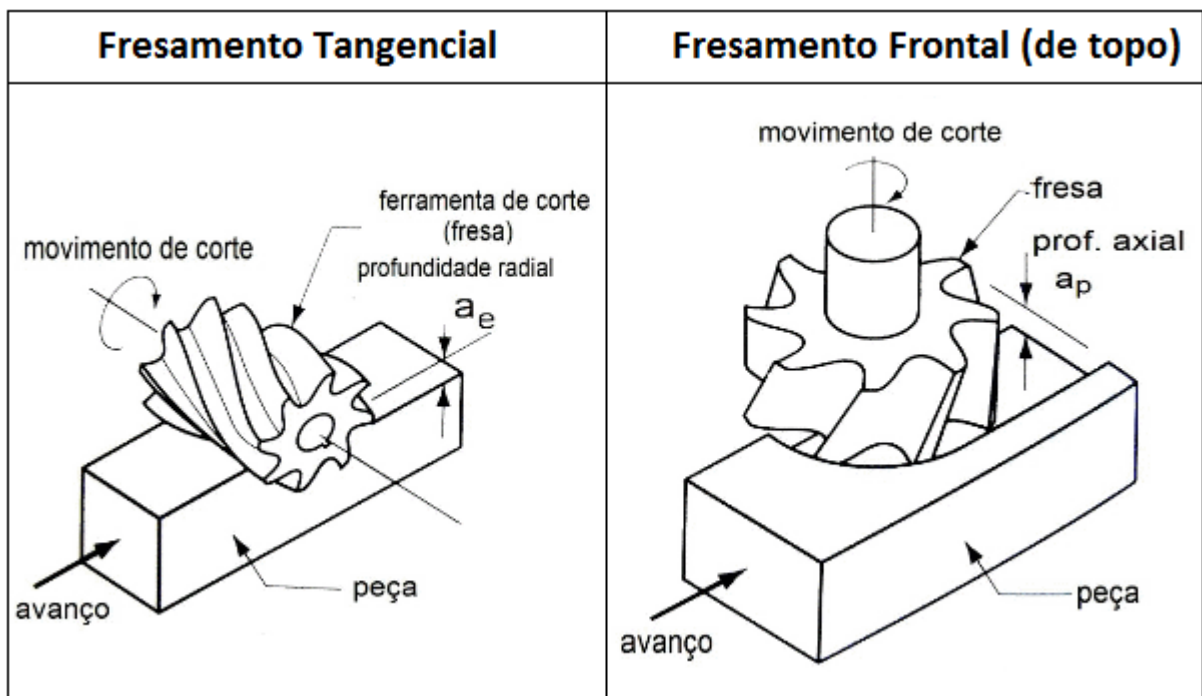


Figura 2: Fresamento tangencial e fresamento frontal.
Fonte: Adaptado de Teixeira (2017)

3.1.1 Características e parâmetros do processo

Como em todo processo de fabricação, a utilização dos parâmetros adequados são imprescindíveis para a obtenção da peça desejada com a melhor qualidade possível. Segundo Ferraresi (1970), os parâmetros mais influentes no processo de fresamento são definidos e esquematizados a seguir. Na Figura 3, são apresentados os parâmetros de avanço para um fresamento discordante:

- Avanço (f): é o percurso de avanço em cada curso da ferramenta.

- Avanço por dente (f_z): é o percurso de avanço de cada dente, medido na direção do avanço da ferramenta.
- Avanço de corte efetivo (f_e): é a distância entre duas superfícies de corte consecutivas formadas, medida no plano de trabalho e perpendicular à direção efetiva de corte.

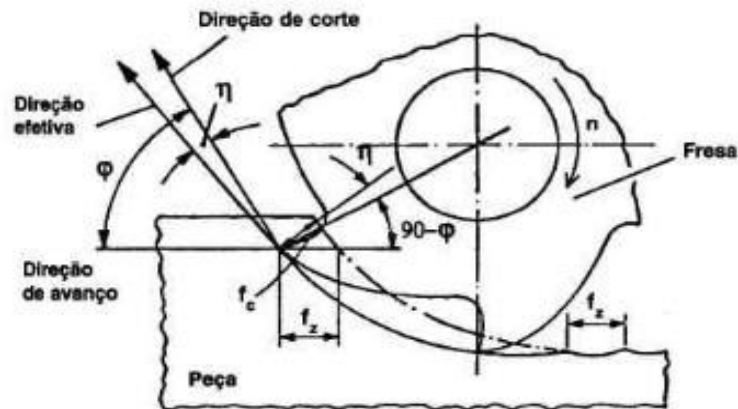


Figura 3: Avanço por dente (f_z) e avanço efetivo (f_e) no fresamento.
Fonte: NBR 6162 (1989)

Na Figura 4, são apresentados os vetores referentes à velocidade de corte, à velocidade de avanço e à velocidade efetiva no fresamento:

- Velocidade de corte (v_c): é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de cortante, segundo a direção e sentido de corte.
- Velocidade de avanço (v_f): é a velocidade instantânea da ferramenta segundo a direção e sentido de avanço.
- Velocidade efetiva de corte (v_e): é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de cortante, segundo a direção efetiva de corte.

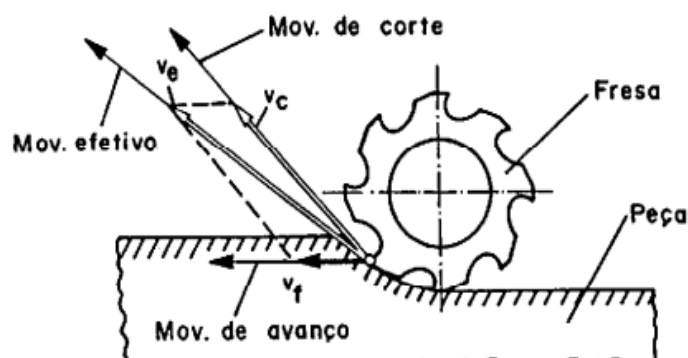


Figura 4: Velocidade de corte (v_c), velocidade de avanço (v_f), velocidade efetiva (v_e) no fresamento.

Fonte: NBR 6162 (1989)

A velocidade de corte é calculada segundo a Eq.(1).

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [mm/min] \quad (1)$$

Onde, D representa o diâmetro da fresa em mm e n a rotação da fresa em rpm. Já a velocidade de avanço é formulada pela Eq.(2).

$$v_f = n \cdot Z \cdot f_z \quad [mm/min] \quad (2)$$

Onde, Z representa o número de dentes da fresa e f_z o avanço por dente em mm.

Na Figura 5, são apresentados os parâmetros de profundidade de corte e espessura de penetração:

- Profundidade de corte (a_p): é a profundidade de penetração da aresta principal de corte, medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho.
- Espessura de penetração (a_e): é a espessura de corte em cada curso, medida no plano de trabalho e numa direção perpendicular à direção de avanço.

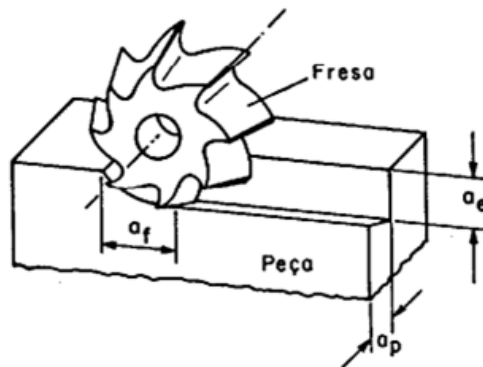


Figura 5: Profundidade de corte (a_p) e espessura de penetração (a_e).

Fonte: NBR 6162 (1989)

3.1.2 Fresa de Topo

Como mostrado na Figura 6, o eixo da fresa de topo está disposto perpendicularmente à superfície da peça, de forma que dentes ativos estão na superfície

frontal da ferramenta. Na fresa de topo, o eixo da ferramenta é perpendicular à superfície que está sendo gerada. Este tipo de ferramenta vem ganhando grande empregabilidade na fabricação de superfícies, ranhuras, contornos e cavidade, tendo uma máxima rentabilidade se comparada a outras. Dentre muitas possíveis variações de um processo de fresamento, a ferramenta fresa de topo é uma das que possui um maior emprego dentro do setor de fabricação industrial, devido à sua alta taxa de remoção de material aliando boa precisão superficial e acabamento. Podemos classificar as fresas de topo em: fresas com insertos intercambiáveis, fresas integrais e micro fresas.

As fresas de topo com insertos intercambiáveis realizam o processo de retirada de cavaco por meio das arestas cortantes dos insertos de metal duro, fixados no corpo da ferramenta, como mostrado na Figura 6. À medida que as pastilhas se desgastam, pode-se alterar a aresta cortante ou substituir as pastilhas, sendo este processo mais rápido quando comparado com as fresas integrais, onde é necessário realizar a afiação destas arestas.



Figura 6: Fresa de topo com insertos intercambiáveis.

Fonte: Disponível em <<https://www.dormerpramet.com>>, acessado em 18/02/2019.

As fresas de topo integrais são fabricadas a partir de um corpo cilíndrico de metal duro que posteriormente suas arestas de cortes, ângulos e canais são usinados, conforme mostrado na Figura 7. O uso prolongado da ferramenta aliado às condições de usinagem provocam o desgaste das arestas de corte, sendo necessário a reafiação da fresa, aumentando assim o tempo inativo na máquina-ferramenta. Grandes empresas e centros de usinagem possuem um setor específico de afiação em massa, mantendo um bom número de peças de reposição, na operação e eliminando a parada da máquina-ferramenta. Na Figura 8 é apresentado fresas integrais com topo reto e topo arredondado.

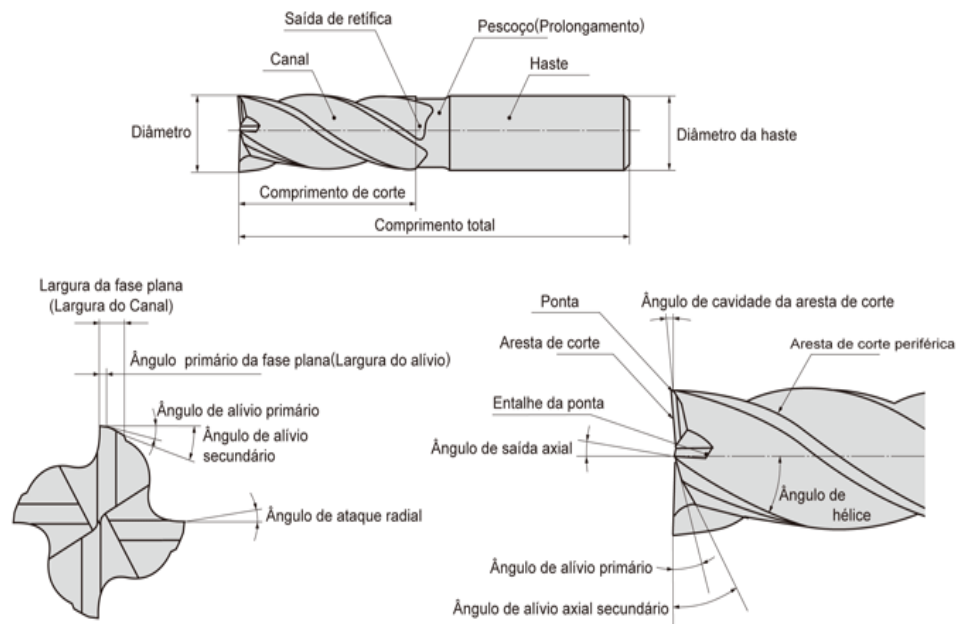


Figura 7: Características da fresa de topo.

Fonte: Disponível em <<http://www.lojadeferramentasonline.com.br>>, acessado em 18/02/2019.



Figura 8: Fresa de topo integral.

Fonte: Disponível em <<https://www.dormerpramet.com>>, acessado em 18/02/2019.

As micro fresas são produzidas a partir de um bastão de metal duro, podendo ter diâmetros de grandezas micrométricas. São utilizadas em micro usinagem e para fabricação de geometrias especiais, Figura 9.

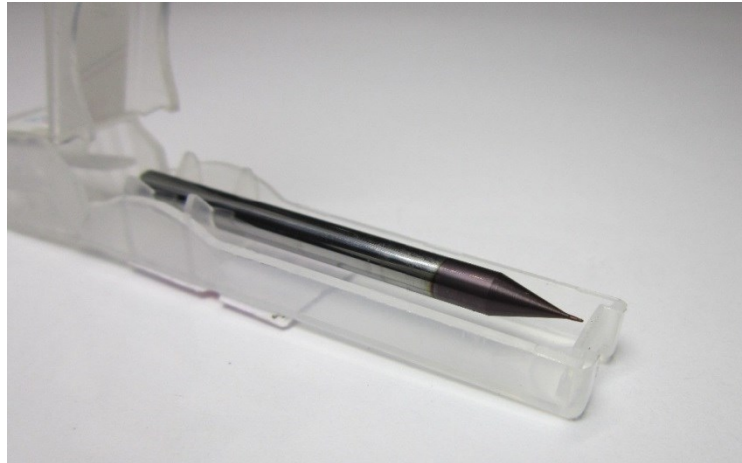


Figura 9: Micro fresa HRC55 Carboneto de Tungstênio.

Fonte: Disponível em <<http://www.heinz-tools.com>>, acessado em 18/02/2019.

3.1.3 Direção concordante e discordante de corte

No fresamento concordante a ferramenta de corte avança no sentido da direção da rotação, como mostrado na Figura 10. A espessura dos cavacos diminuirá a partir do início do corte, se aproximando de zero gradualmente ao final do corte. Isso evita o esfregamento e a queima da aresta contra a superfície antes do início do corte. Dessa maneira de forma geral o fresamento concordante é o método mais indicado quando há não restrições quanto à geometria final da peça e sempre que a máquina-ferramenta permite.

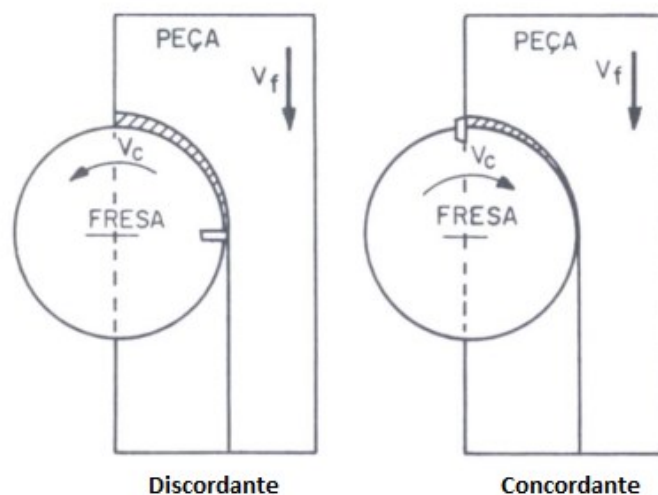


Figura 10: Fresamento discordante e concordante
Fonte: Stemmer (2005)

No fresamento discordante a direção de avanço da ferramenta de corte é oposta à sua rotação. A espessura de cavaco começa em zero e aumenta até o final do corte. A aresta de corte precisa ser forçada para dentro do corte, criando um efeito de esfregamento ou de queima devido ao atrito, altas temperaturas e, geralmente, contato com a superfície endurecida pelo trabalho causado pela aresta anterior.

3.1.4 Potência de usinagem no fresamento de topo

A potência de usinagem é essencialmente a força realizada pela máquina para remover certa quantidade de material em um determinado tempo. Tal grandeza representa o gasto energético que o processo de usinagem demanda, sendo utilizada no dimensionamento do motor da máquina-ferramenta. Segundo Diniz (2006), as forças de usinagens são os principais fatores que influenciam na potência requerida, assim o estudo da ação dessas forças sobre a cunha cortante e suas grandezas é de grande importância.

Os esforços da peça sobre a ponta da ferramenta são considerados como forças de usinagem, a resultante desses esforços recebe o nome de força de usinagem (F_u). A decomposição dessa força é mostrada na Figura 11.

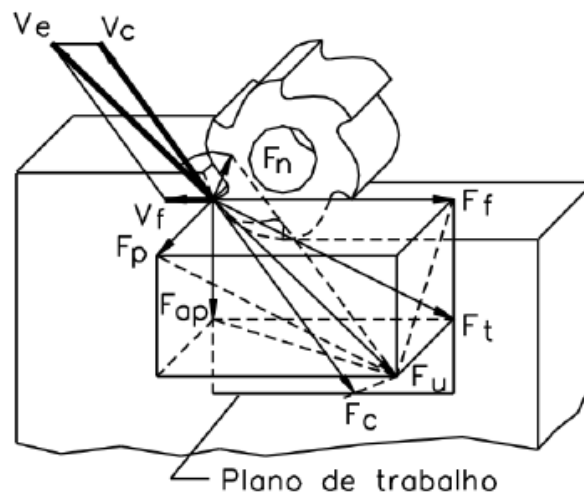


Figura 11: Componentes da força de usinagem no fresamento.
Fonte: Machado e Silva (2004)

De acordo com Machado (2004), no espaço tridimensional a força de usinagem (F_u) decompõe-se em três componentes básicas:

- Força de corte (F_c): é a projeção da força de usinagem (F_u) sobre plano de trabalho, na direção da velocidade de corte (v_c).
- Força de avanço (F_f): é a projeção da força de usinagem (F_u) sobre plano de trabalho, na direção da velocidade de avanço (v_f).

- Força de profundidade (F_p): é a projeção da força de usinagem (F_u) perpendicular ao plano de trabalho.

Usando outros referenciais, identificam-se outras componentes importantes da força de usinagem (F_u), segundo Machado (2004):

- Força ativa (F_t): é a projeção ortogonal da força de usinagem (F_u) sobre plano de trabalho.
- Força de compressão (F_n): é a projeção da força de usinagem (F_u) sobre uma direção perpendicular à superfície principal de corte.
- Força de apoio (F_{ap}): é a projeção da força de usinagem (F_u) sobre uma direção perpendicular à direção da velocidade de avanço (v_f), no plano de trabalho.

A força de usinagem (F_u) é dada pelas suas três principais componentes pela Eq. (3).

$$F_u = \sqrt{F_{ap}^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (3)$$

Diniz (2006) descreve quais são os principais fatores que afetam, em maior ou menor grau, as forças de usinagem durante a operação de fresamento:

- Material da peça: a composição química de cada material irá influenciar na energia requerida para a deformação plástica durante a formação do cavaco. De forma geral, quanto maior a dureza do material maior será a grandeza das forças de usinagem, havendo exceções quando há presença de elementos de liga.
- Material e geometria da ferramenta: quando se varia o material da ferramenta o coeficiente de atrito entre o cavaco e a ponta da ferramenta se altera, porém, segundo Nakayama e Arai (1987), essas variações são depressíveis. Já o aumento do ângulo de saída e do ângulo de inclinação da fresa geram uma diminuição das forças de usinagem devido à menor deformação plástica durante a formação do cavaco.
- Avanço e velocidade de corte: são parâmetros que influenciam no fluxo de formação do cavaco e conseqüentemente nos esforços sobre a ferramenta. Segundo Barbosa (2014), alguns estudos têm demonstrado a queda da força de corte com o aumento da velocidade de corte. Os efeitos térmicos gerados com o aumento da velocidade

ocasiona uma diminuição do limite de escoamento do material além da diminuição da espessura do cavaco ocasionando essa redução dos esforços de corte.

- Condições de lubrificação e refrigeração: quanto maior for a penetração do fluido de corte e maior seu efeito lubrificante maior será a influência na diminuição das forças de usinagem.
- Desgaste da ferramenta: gera-se alterações na geometria e composição do material da ferramenta, podendo ter alterações nos efeitos térmicos e de atrito.

Segundo Diniz (2006) no fresamento os dentes da fresa ora estão em contato com a peça ora não há este contato, como mostrado na Figura 10, e a espessura do cavaco varia durante o arranque de material por cada dente, estes fatores fazem com que a potência de corte requerida na operação varie a todo instante. Assim para dimensionar a potência média de usinagem no fresamento usa-se o parâmetro do valor médio da pressão específica de corte (K_s). O valor desse parâmetro teoricamente representa a força tangencial necessária para a retirada de material da peça com uma seção de um milímetro quadrado.

Uma aproximação para a potência em função da quantidade de material removida no tempo e da pressão específica de corte média pode ser dada pela Eq.(4).

$$P_c = \frac{K_s \cdot a_p \cdot a_e \cdot Z_c \cdot v_f}{60 \cdot 10^6} \quad (4)$$

- Potência de corte efetiva (P_c) – dada em kW
- Profundidade de corte (a_p) – dada em mm
- Espessura de penetração (a_e) – dada em mm
- Velocidade de avanço (v_f) – dada em mm/min
- Coeficiente de pressão específica de corte (K_s) – dado em MPa
- Número de arestas de corte (Z_c)

3.2 Inconel® 718

Nas últimas décadas o emprego das superligas de níquel vem ganhando espaço para aplicações em situações rigorosas de trabalho principalmente a altas temperaturas e em ambientes altamente corrosivos, algumas das aplicações são em componentes de motores a jato como mostrado na Figura 12. Inicialmente empregadas na indústria aeroespacial para a fabricação de peças de turbinas e compressores, rapidamente devido a

suas composições e propriedades estas superligas passaram a também estar presentes em peças das indústrias petroquímicas, automobilística e nos setores médico, químico, entre outros (SANTOS-JÚNIOR, 2011). Durante a fabricação de peças usando este material um fino acabamento superficial torna-se necessário a fim de minimizar irregularidades e pontos de concentração de tensões, que, senão empregando um processo adequado, podem favorecer a nucleação e propagação de trincas diminuindo a vida útil do componente. Assim, o estudo pós-processo de fabricação se mostra necessário para verificar quais as influências dos parâmetros de usinagem na integridade superficial da peça final, micro dureza e tensões residuais. (Figura 12).

O Inconel® 718 pertence à família das superligas à base de Ni-Cr que tem uma grande variedade de ligas com propriedades mecânicas e aplicações variadas. O Inconel® 718 destaca-se devido as suas propriedades de elevada resistência mecânica, boa resistência à fadiga e fluência, boa resistência à corrosão (SUGAHARA, 2012). Em sua constituição está presente o nióbio contendo de 5,3% a 5,5% do elemento.



Figura 12: Utilização de Inconel® 718 na indústria.

3.3 Método dos Elementos Finitos

De forma geral, os processos de usinagem são regidos por uma grande quantidade de parâmetros. Cada um deles tem uma influência direta com o resultado e a qualidade final da peça produzida. Devido a essa complexidade de variáveis, tem sido de grande interesse o desenvolvimento de métodos práticos e analíticos que buscam determinar o comportamento

desses parâmetros durante o processo de usinagem. Contudo, nenhum desses métodos é aceito pelo meio científico como tendo aplicabilidade universal (MACHADO; SILVA, 2004).

Dentre as técnicas analíticas modernas de determinação do comportamento da temperatura e potência durante a usinagem, objetivo deste trabalho, pode-se destacar o Método dos Elementos Finitos. Segundo Reddy (1993), o método dos Elementos Finitos é atualmente uma das melhores ferramentas para a simulação de variados problemas de engenharia, tais como, mecânica dos sólidos, transferência de calor, mecânica dos fluidos, análise estrutural, entre outros. É um método de discretização, ou seja, propõe dividir um meio contínuo com um número infinito de variáveis desconhecidas em unidades menores finitas e discretas, chamadas elementos, com a finalidade de facilitar os cálculos.

Os elementos finitos são conectados entre si por pontos, denominados de pontos nodais ou nós. Ao conjunto de elementos e nós dá-se o nome de malha, conforme Figura 13. No Método dos Elementos Finitos as equações matemáticas que regem o comportamento físico não serão resolvidas de maneira exata, mas de forma aproximada para cada elemento da malha. A escolha adequada dos parâmetros de malha irá garantir a precisão do resultado, assim como seu custo computacional. Os parâmetros de malha são: a quantidade de elementos, o tamanho dos elementos e formato dos elementos.

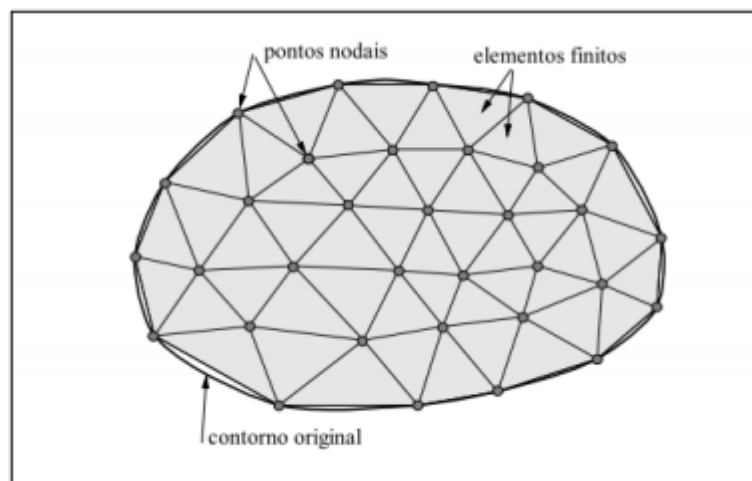


Figura 13: Malha de elementos finitos 2D
Fonte: Adaptado de Souza (2003)

Um dos fatores que afeta a qualidade do resultado é a quantidade dos elementos, quanto maior o número de elementos e por consequência menor o tamanho dos elementos maior a precisão nos resultados e maior será o custo computacional da análise.

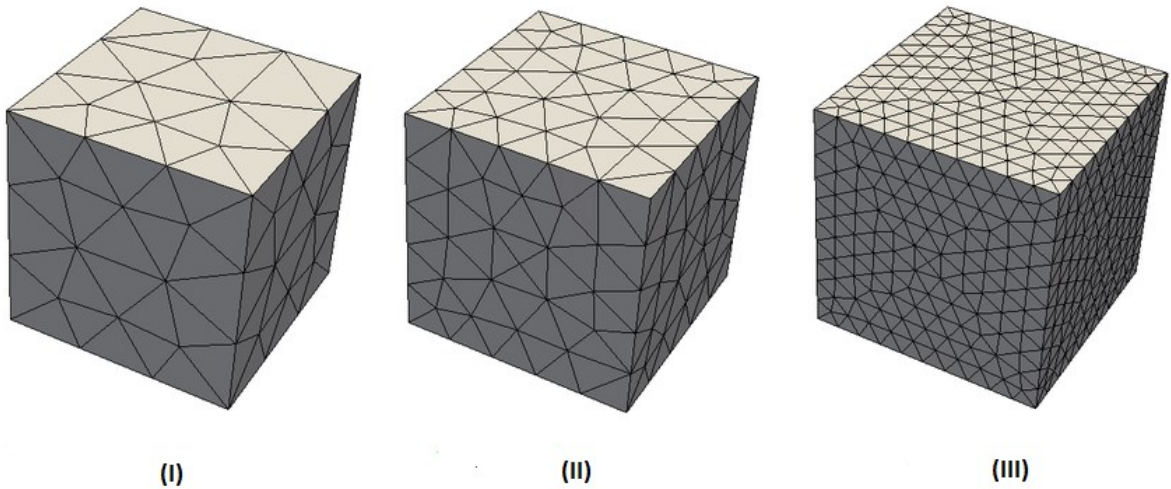


Figura 14: Refinamento da malha: (I) grosseiro (II) intermediário (III) refinado.
Fonte: Adaptado de Campos (2016)

A geometria a ser discretizada pode ser dividida em elementos de diferentes tipos. Para um problema 2D, os elementos podem ser triangulares ou retangulares e para o caso tridimensional 3D, os elementos serão prismas ou quadriláteros. Em problemas bidimensionais, devido a sua capacidade de aproximar o contorno de estruturas com geometrias complexas elemento triangular é mais utilizado (REDDY, 2006).

3.3.1 Modelagem da deformação

De acordo com Man et al. (2012), o software Advantedge® usa a descrição Lagrangeana do equilíbrio dinâmico de um sólido deformável regido pela seguinte equação integral:

$$\int_{B_0} P_{n+1} : \nabla \eta dV_0 - \int_{B_0} (f_{n+1} - \rho_0 a_{n+1}) \eta dV_0 - \int_{\partial B_0 \zeta} t_{n+1} \eta dS_0 \quad (5)$$

Onde P_{n+1} corresponde ao primeiro tensor de tensão de Piola-Kirchhoff no tempo t_{n+1} . As variáveis dinâmicas como forças atuantes no corpo, acelerações e trações de fronteiras são dadas por f_{n+1} , a_{n+1} e t_{n+1} , respectivamente. A densidade do corpo no ponto de referência B_0 é dada por ρ_0 , η denota o campo de deslocamento virtual admissível e ∇ o gradiente material (MAN et al., 2012). Discretizando no espaço a Eq.(5), utilizando o método dos elementos finitos chega-se a:

$$M a_{n+1} + F_{r_{n+1}}^{int} = F_{r_{n+1}}^{ext} \quad (6)$$

Onde $F_{r_{n+1}}^{int}$ e $F_{r_{n+1}}^{ext}$ correspondem ao vetor de forças internas e externas respectivamente. M é a matrix de massa e a_{n+1} é o vetor de aceleração. A discretização no tempo é realizada utilizando o esquema de diferença central com o algoritmo explícito de escalonamento de tempo (HUGHES, 1987)

$$d_{n+1} = d_n + \Delta t v_n + \frac{1}{2} \Delta t^2 a_n \quad (7)$$

$$a_{n+1} = M^{-1} (F_{r_{n+1}}^{ext} - F_{r_{n+1}}^{int}) \quad (8)$$

$$v_{n+1} = v_n + \frac{1}{2} \Delta t (a_{n+1} + a_n) \quad (9)$$

Onde d e v denotam respectivamente os vetores de deslocamento e velocidade.

3.3.2 Modelagem da temperatura

Nos processos de usinagem é bastante significativo os efeitos térmicos causados pelo calor gerado com a deformação plástica no sólido e pelo atrito da interface ferramenta-peça-cavaco. Essa geração de calor pode aumentar significativamente a temperatura do sistema, para modelar esses efeitos térmicos o software utiliza a Eq. (10) (MAN et al., 2012):

$$\int_{B_t} \rho c \dot{T} \eta dV - \int_{\partial B_{Tq}} h \eta dS = \int_{B_t} q \nabla \eta dV + \int_{B_t} s \eta dV \quad (10)$$

Onde ρ representa a densidade do material, c a capacidade térmica, T o campo de temperatura, e q o fluxo de calor. O calor devido ao atrito é levado em conta por meio do coeficiente de atrito h . Uma fração do trabalho realizado para a deformação plástica é transformada em calor, essa parcela é contabilizada pelo fator s .

4. METODOLOGIA

Favero-Filho (2018), em sua dissertação de mestrado, realizou o fresamento de topo concordante em uma peça de Inconel® 718 para as condições apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Condições de usinagem ensaios de Favero-Filho

Condição	Parâmetros de Usinagem		
	Rotação da fresa (rpm)	Velocidade de corte (m/min)	Avanço por dente (mm)
A	477	15	0,016
B	477	15	0,031
C	2387	75	0,016

Fonte: Favero-Filho (2018)

Para o desenvolvimento deste trabalho utilizou-se o software Advantedge®, especializado em simulações de processos de fabricação. O modelo do fresamento de topo foi tratado de forma 2D, como mostrado na Figura 15.

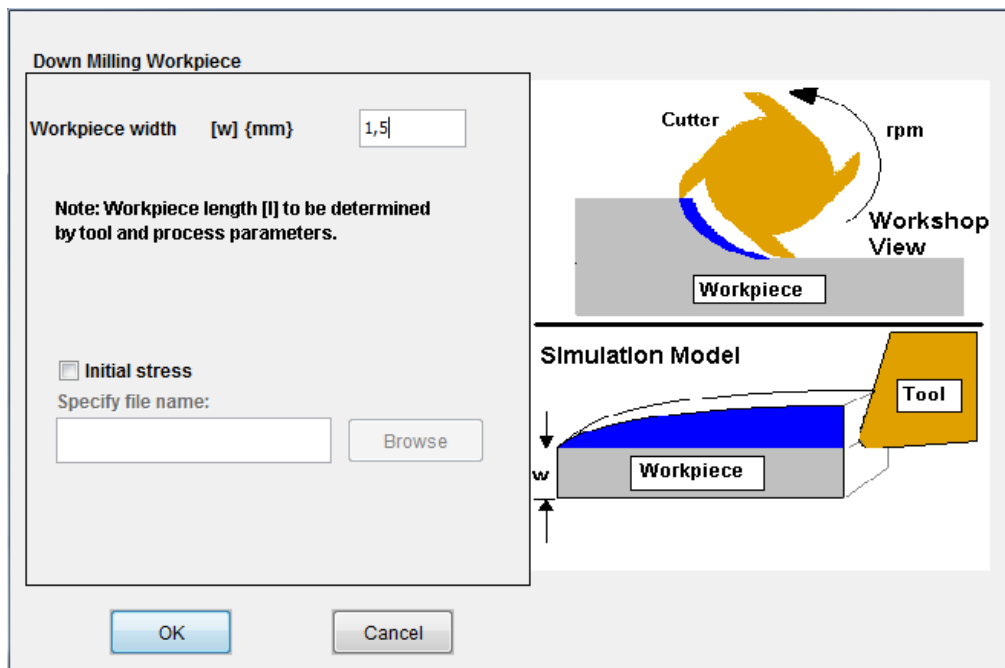


Figura 15: Modelo de fresamento de topo, análise 2D.

Fonte: Advantedge®

O software apresenta uma lista para a escolha do material da peça e sua respectiva dureza, tratando-se de uma liga de Níquel seleciona-se o Inconel® 718, como mostrado na Figura 16.

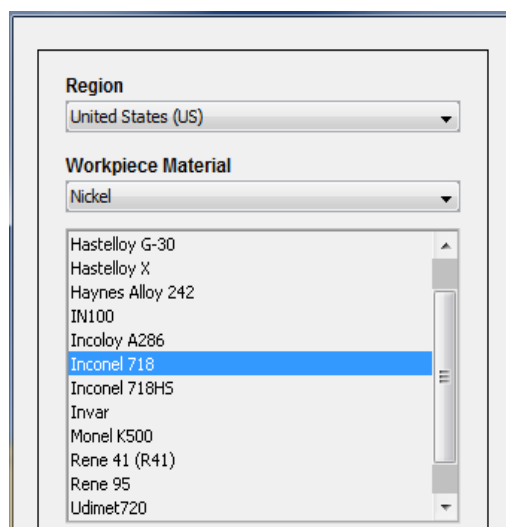


Figura 16: Seleção do material da peça.
Fonte: Advantedge®

A ferramenta utilizada nos ensaios do Favero-Filho (2018), Figura 17, é do tipo fresa de topo reto com quatro arestas cortantes. Como o modelo é 2D os parâmetros inseridos no software referem-se à uma das arestas de corte da fresa, Figura 18. Os parâmetros são: diâmetro da fresa, raio da ponta da fresa, ângulo de inclinação e ângulo de alívio.



Figura 17: Ferramenta utilizada nos ensaios do Favero-Filho, montada no suporte.
Fonte: Favero-Filho (2018)

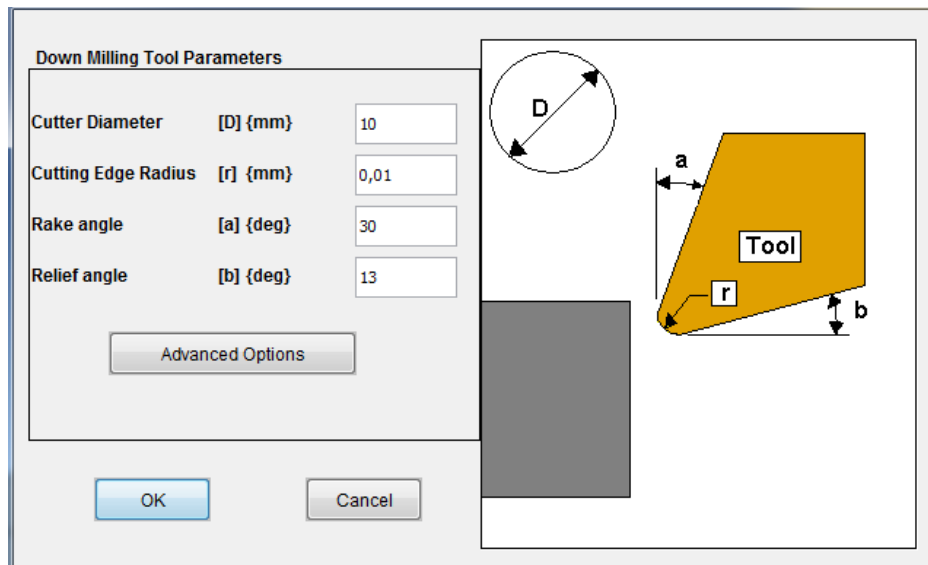


Figura 18: Caracterização da geometria da fresa de topo.
Fonte: Advantedge®.

Os parâmetros do processo de fresamento são inseridos no software como mostra a Figura 19. Para a rotação e avanço por aresta de corte foram utilizados os valores expressos na Tabela 1. Conforme ensaios experimentais realizados pelo Favero-Filho (2018), a de profundidade de corte (a_p) usada foi de 6mm e espessura de penetração (a_e) foi de 0,5mm. Para a temperatura usou-se o valor de 30°C para todas as simulações.

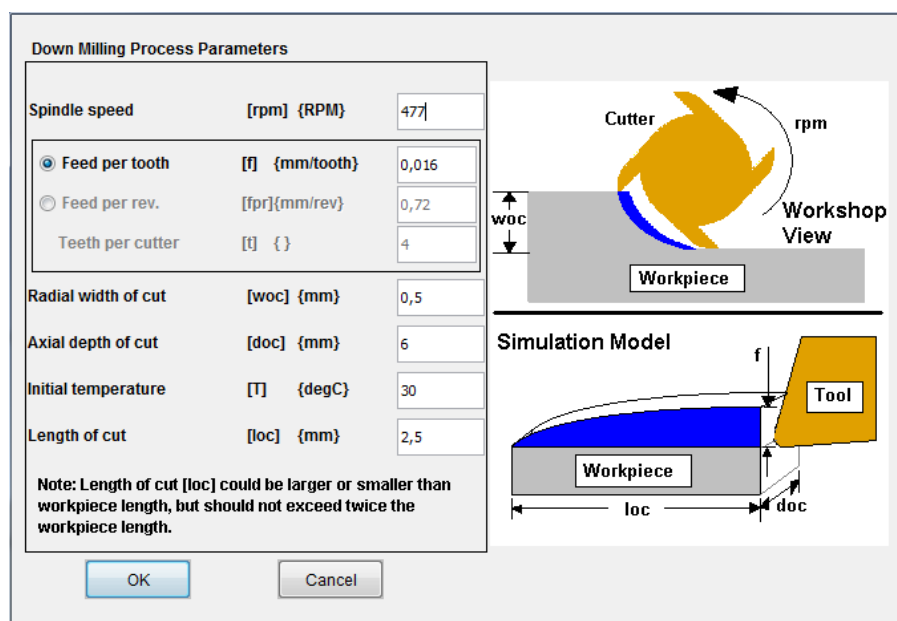


Figura 19: Parâmetros do processo de fresamento.
Fonte: Advantedge®

Para gerar a malha a partir da superfície do modelo o software usa os parâmetros de

tamanho máximo e mínimo do elemento e o número máximo de nós, como mostra a Figura 20. O tamanho de cada elemento varia de acordo com sua posição dentro da geometria formada pela peça-ferramenta, de modo que software aumenta o refino da malha na região do contato ferramenta-peça-cavaco de modo a gerar resultados mais precisos nessa região de maior interesse. Já em posições da peça que estão distantes do contato com a ferramenta, o software usa uma malha mais grosseira, respeitando o tamanho máximo do elemento.

Minimum / maximum element size		
Suggested maximum element size	{mm}	<input type="text" value="0,8"/>
Suggested minimum element size	{mm}	<input type="text" value="0,001"/>
Cutting edge radius to det. min. elem. size		<input type="text" value="0,1"/>
Feed fraction to det. min. elem. size		<input type="text" value="0,1"/>
Max. number of nodes		<input type="text" value="24000"/>

Figura 20: Parâmetros utilizados para gerar a malha.

Fonte: Advantedge®

5. RESULTADOS E DISCUSÕES

Como o parâmetro de avanço usado pelo Favero-Filho (2018) era muito baixo (0,016mm e 0,031mm por dente), tratando-se de super acabamento, o modelo necessitava de um alto refinamento de malha para convergir, gerando um alto custo computacional, a figura 21 mostra o alto refinamento na região do contato peça-ferramenta. Em média as simulações duram-se mais de 30hrs, utilizando um microcomputador do LPU. Devido é essa ausência de monitoramento prévio das variáveis, utilizou-se um prazo em torno de três meses para encontrar os parâmetros adequados para o refinamento da malha.

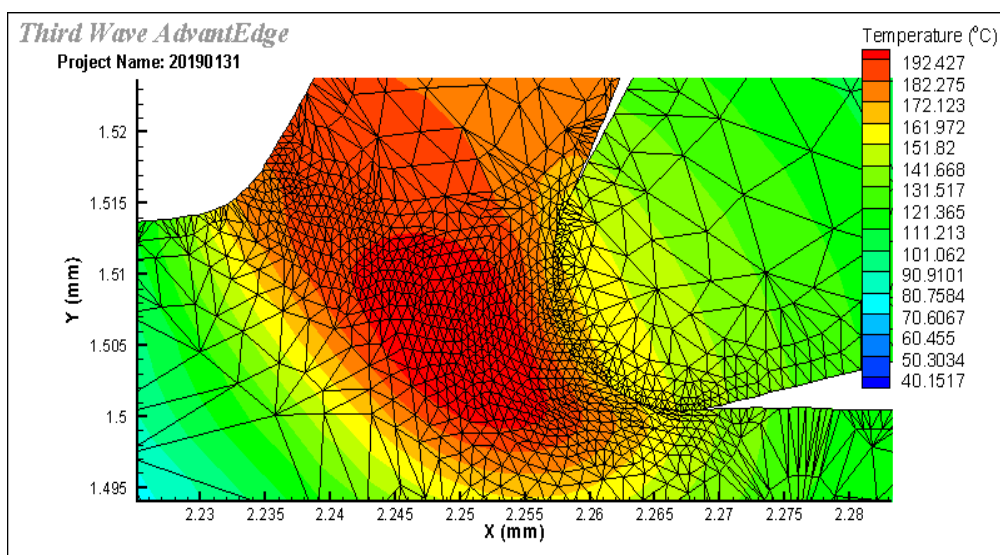


Figura 21: Refinamento da malha na região do contato peça-ferramenta.

5.1 Visualização das tensões plásticas e formação do cavaco

Durante o processo de usinagem a cunha da ferramenta deforma a peça, inicialmente de forma elástica, até que o aumento da tensão provocado pelo avanço da ponta da ferramenta atinge o limite de escoamento do material e este começa a se deformar plasticamente. A Figura 22 mostra a distribuição da tensão plástica sobre o conjunto peça-ferramenta. A partir do momento em que se atinge a tensão de ruptura do material começa a formação do cavaco. Na Figura 22, também fica visível o ângulo de cisalhamento primário que separa a região da peça que já sofreu deformação plástica do resto do material que ainda não se deformou plasticamente.

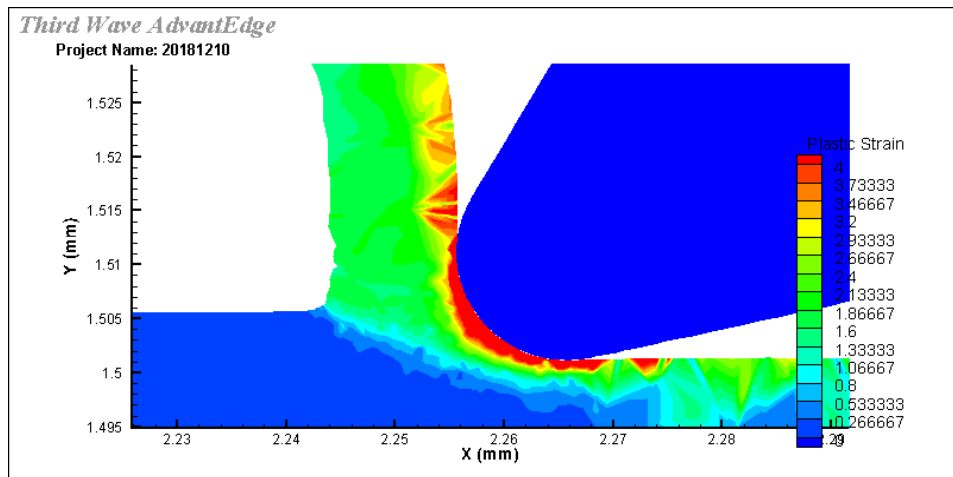


Figura 22: Condição A: velocidade de corte 15m/min e avanço de 0,016mm por dente.
Fonte: Advantedge®

As simulações feitas no Advantedge® usaram os mesmos parâmetros de usinagem utilizados por Favero-Filho, conforme Tabela1. As figuras a seguir mostram a formação do cavaco para as diferentes condições de velocidade de corte e avanço da fresa. Comparando a Figura 23 com a Figura 24, nota-se que mantendo a velocidade de corte de 15 mm/min a espessura do cavaco aumenta com o aumento do avanço, como esperado pela literatura.

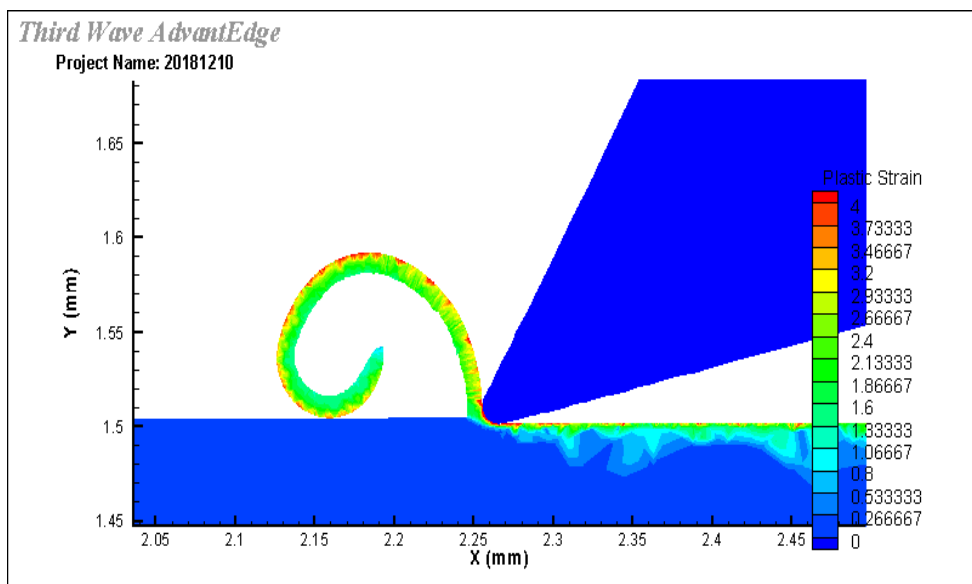


Figura 23: Condição A: velocidade de corte 15m/min e avanço de 0,016mm por dente.
Fonte: Advantedge®

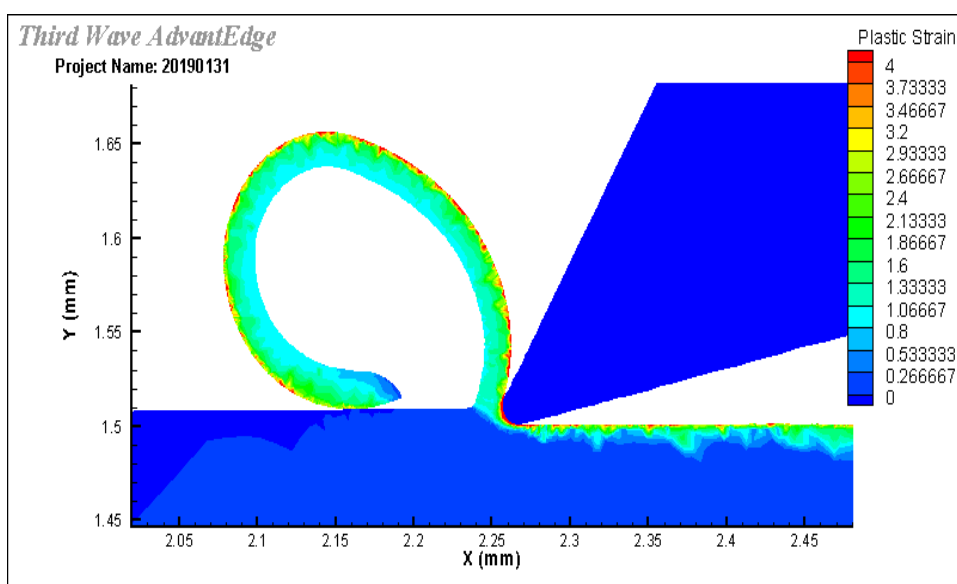


Figura 24: Condição B: velocidade de corte 15m/min e avanço de 0,031mm por dente.
Fonte: Advantedge®

5.2 Comparação dos resultados

A Tabela 2 mostra os resultados de potência média e temperatura obtidos usando o modelo baseado no Método dos Elementos Finitos. Primeiramente, analisando as condições A e B nota-se a tendência de aumento da potência e da temperatura com o aumento do avanço da fresa. Como a taxa de remoção de material é maior, devido ao aumento do avanço, ocorre aumento da geração de calor devido à maior quantidade de material que se deforma plasticamente. No caso das condições A e C, o aumento da potência e temperatura está relacionado à maior taxa de cisalhamento, que se deve a maior velocidade de corte, deformando mais material num menor intervalo de tempo. Esse comportamento está de acordo com as explicações de Machado e Silva (2004).

Tabela 2: Resultados obtidos numericamente via simulação no Advantedge®

Condição	Parâmetros de Usinagem		Resultados da Simulações	
	Velocidade de corte (m/min)	Avanço por dente (mm/rot)	Potência média (W)	Temperatura (°C)
A	15	0,016	2,6	159,45
B	15	0,031	4,38	198,14
C	75	0,016	13,33	403,18

A Tabela 3 mostra os resultados de potência média e temperatura obtidos experimentalmente.

Tabela 3: Resultados obtidos experimentalmente feitos por Favero-Filho (2018)

Condição	Parâmetros de Usinagem		Resultados Experimentais	
	Velocidade de corte (m/min)	Avanço por dente (mm/rot)	Potência média (W)	Temperatura (°C)
A	15	0,016	13,01	155,55
B	15	0,031	16,76	209,12
C	75	0,016	15,6	370,31

Comparando os resultados experimentais com os obtidos pela simulação chegou-se aos seguintes valores de erros relativos, mostrados na Tabela 4 abaixo:

Tabela 4: Erros relativos

Condição	Erro relativo da potência	Erro relativo da temperatura
A	80,0%	2,4%
B	73,9%	5,3%
C	14,6%	8,2%

Experimentalmente para medir a temperatura utilizou-se uma câmera termográfica infravermelha, modelo A325 da marca FLIR Tools, com resolução de 320 x 240 pixels e uma precisão de ± 2 °C (FAVERO-FILHO, 2018). Os valores obtidos via o modelo numérico atingiu valores bem próximos ao observado nos ensaios, sendo que a condição C apresentou o maior erro relativo.

Já os resultados para a potência apresentaram uma incongruência relevante. Alguns fatores podem ter contribuído para os resultados da potência não serem satisfatórios. Primeiramente, as equações diferenciais que modelam o problema usam como constante algumas grandezas que podem variar durante o processo de usinagem. Ao ignorar os efeitos da não linearidade para grandezas como coeficiente de atrito, densidade do material e presença de imperfeições na peça pode fazer com que o modelo acumule erro. Essas não linearidades também estão presentes no modelo constitutivo do software, o qual descreve a deformação plástica e seus efeitos de endurecimento por encruamento e perda de resistência em altas temperaturas. Esse modelo é baseado nos resultados de um número limitado de experimentos, conduzidos nas condições de corte mais usuais. Assim, as condições de avanço extremamente baixo, utilizadas nas simulações desde trabalho, também podem explicar os erros encontrados para a potência de corte, pois segundo Man et al. (2012), observa-se aumento do erro relativo quando se diminui o avanço nas simulações com Advantedge®.

Outro fator que possivelmente pode ter contribuído para essa discrepância é a pouca precisão do método que foi utilizado para medir experimentalmente a potência, que foi

obtida de forma indireta através da medida da tensão e da corrente elétrica do motor de indução trifásico (9 kW), sendo que estas medidas foram obtidas através de dois sensores de efeito Hall em cada fase do acionamento do centro de usinagem (FAVERO-FILHO, 2018).

6. CONCLUSÃO

Ao longo do trabalho foi feita uma revisão bibliográfica sobre os conceitos de fresamento de topo, parâmetros de usinagens, Inconel® 718, métodos de elementos finitos, entre outros. Em seguida, foi proposto um modelo computacional 2D em elementos finitos para descrever o fresamento de topo do Inconel® 718. Simulou-se o modelo para três condições de usinagens diferentes, onde os parâmetros de velocidade de corte e o avanço da ferramenta variaram. E em seguida, fez-se uma análise comparando os resultados obtidos via recurso computacional com os resultados experimentais expostos por Favero-Filho (2018).

Podem-se chegar as seguintes conclusões:

- O refinamento da malha foi essencial para a convergência do modelo, visto que os valores de avanços eram muito baixos.
- A formação do cavaco e a distribuição de tensões seguiram as tendências presente na literatura, no que diz respeito ao aumento da potência e temperatura devido ao aumento do avanço e velocidade de corte da fresa.
- Os valores obtidos da temperatura aproximaram aos encontrados experimentalmente.
- Os valores da potência média de usinagem divergiram do encontrado experimentalmente. As causas, possivelmente, podem estar na aquisição de dados durante os ensaios ou da baixa precisão do modelo numérico.

Algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- Propor um modelo 3D para descrever o processo de fresamento de topo do Inconel® 718.
- Avaliar a influência do fator de atrito para as mesmas condições de usinagem.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6162: Movimentos e Relações Geométricas Na Usinagem Dos Metais**. Rio de Janeiro, p. 24. 1989.

BARBOSA, R. S. **Avaliação dos esforços de corte no fresamento frontal da liga de alumínio - silício (A356) quando mantido constante a produção de peças**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica). Universidade Federal de São João Del Rei, Departamento de Engenharia Mecânica, 68f., 2014.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. Editora Artliber, 2006.

FAVERO-FILHO, Antônio. **Fresamento de topo do inconel® 718 com ferramentas de metal duro microgrãos**. Dissertação de mestrado (Engenharia Mecânica). Universidade federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2018.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Blücher, 1970.

HUGHES, Thomas JR. **The Finite Element Method**. New Jersey: Prentice-Hall, 1987.

MACHADO, Alisson Rocha; SILVA, M.B. **Usinagem dos metais**. 8.ed. Uberlândia: LEPU–UFU, 2004.

MAN, Xialin et al. Validation of finite element cutting force prediction for end milling. **Procedia CIRP**, v. 1, p. 663-668, 2012.

NAKAYAMA, K., & ARAI, M. Burr formation in metal cutting. **CIRP Annals**, v.36, n.1, p.33-36, 1987.

REDDY, Junuthula Narasimha. **An introduction to the finite element method**. New York, 1993.

SANTOS-JÚNIOR, Tarcisio Antunes dos. **Avaliação da usinagem do INCONEL 718**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de corte I**. 4. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995.

SUGAHARA, Tarcila et al. Creep behavior of the Inconel 718 superalloy. **In: Defect and Diffusion Forum**, p. 509-514, 2012.