

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
ENGENHARIA AUTOMOTIVA

VITOR JACINTHO LEAL DE CARVALHO

MODELAGEM MATEMÁTICA DA GEOMETRIA DO CAVACO RESULTANTE DO
FRESAMENTO DE FORMAS COMPLEXAS COM FERRAMENTA DE PONTA
ESFÉRICA

Joinville

2019

VITOR JACINTHO LEAL DE CARVALHO

MODELAGEM MATEMÁTICA DA GEOMETRIA DO CAVACO RESULTANTE DO
FRESAMENTO DE FORMAS COMPLEXAS COM FERRAMENTA DE PONTA
ESFÉRICA

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Automotiva do Centro Tecnológico de
Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Automotiva.
Orientador: Prof. Dr. Helton da Silva Gaspar
Coorientador: Prof. Dr. Adriano Fagali de Souza

Joinville

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Carvalho, Vitor Jacintho Leal de
Modelagem matemática da geometria do cavaco resultante
do fresamento de formas complexas com ferramenta de ponta
esférica / Vitor Jacintho Leal de Carvalho ; orientador,
Helton da Silva Gaspar, coorientador, Adriano Fagali de
Souza, 2019.
66 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,
Graduação em Engenharia Automotiva, Joinville, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Automotiva. 2. Modelo de área. 3. Formas
complexas. 4. Operações de acabamento. 5. Algoritmo
Numérico. I. Gaspar, Helton da Silva. II. Souza, Adriano
Fagali de. III. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia Automotiva. IV. Título.

VITOR JACINTHO LEAL DE CARVALHO

MODELAGEM MATEMÁTICA DA GEOMETRIA DO CAVACO RESULTANTE DO
FRESAMENTO DE FORMAS COMPLEXAS COM FERRAMENTA DE PONTA
ESFÉRICA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Automotiva” e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia Automotiva.

Joinville, 28 de Novembro de 2019.

Prof. Dr. Modesto Hurtado Ferrer,
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Helton da Silva Gaspar,
Orientador
Instituição USFC

Prof. Dr. Adriano Fagali de Souza,
Coorientador
Instituição USFC

Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues,
Avaliador
Instituição USP-SC

Me. Igor Fernando Basso,
Avaliador
Instituição USP-SC

Este trabalho é dedicado a todos que acreditaram no meu sucesso e me deram suporte ao longo desta trajetória.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço para a realização deste trabalho aos meus Professores Dr. Adriano Fagali de Souza - pela orientação, a amizade durante todo esse percurso e dedicação na minha formação e Dr. Helton da Silva Gaspar - pela orientação e todo tempo despendido em nossas longas reuniões, sem sua dedicação este trabalho não existiria.

Agradeço aos professores Alessandro Roger Rodrigues e Igor Fernando Basso por disporem de um tempo para avaliar o trabalho e darem sua contribuição de melhoria.

Aos meus pais, meu irmão e minha namorada por todo o apoio durante esta jornada.

Aos meus amigos Taiuê Hofmann e Oberdan Castro pelo suporte no desenvolvimento do trabalho. E a todos os integrantes do grupo GPCAM que contribuíram para minha formação pessoal e profissional.

Fica aqui registrado o meu muito obrigado a todos!

“Entendemos que o desenvolvimento de uma tecnologia mecânica dificilmente se processa sem o conhecimento científico dos fatores que nela intervém”

(FERRARESI, 1970)

RESUMO

O trabalho apresenta uma modelagem da área da seção transversal ao corte em operações de fresamento de superfícies complexas, com ferramentas de ponta esférica. Essa operação é largamente utilizada na fabricação de moldes e matrizes para diversas indústrias. Para a produção eficiente de superfícies complexas, é necessário determinar as melhores condições de usinagem, considerando o custo e tempo da produção e qualidade do molde acabado. É primordial entender a área da seção para avaliar as forças geradas durante um corte para determinar as melhores condições de usinagem. Contudo, o cavaco teórico gerado pela trajetória de passes paralelos de uma ferramenta de ponta esférica é uma geometria complexa, e todos os parâmetros de usinagem influenciam em sua forma. Portanto, o objetivo do trabalho é explorar e modelar as influências dos parâmetros na formação da área da seção transversal. O modelo pode prover uma informação mais precisa para o cálculo de forças neste tipo de usinagem. A alta precisão do modelo foi validada com o auxílio de um software CAD.

Palavras-chave: Modelo de área. Formas complexas. Operações de acabamento. Algoritmo numérico.

ABSTRACT

The current work presents a new model to identify the formation of the chip against the time during the milling of a free form surface by a ball-end cutting tool. This sort of machining is widely used in the manufacture of molds and dies, for a variety of industries. The efficient manufacture of complex surfaces requires determining the best milling conditions. To do so, the cross section of the chip must be considered to evaluate the forces generated during the cutting and, ultimately, determine such milling conditions. However, the theoretical removed material generated by the parallel trajectory of a ball end mill is a complex geometry, and all the milling parameters influence its shape. The mathematical model developed in this work can estimate the chip formation against the time (action of one cutting edge), the cross-section area and the chip thickness along its formation time. Thus, the model can provide more precise information for calculating the cutting force in this kind of machining. The high accuracy of the model was validated by geometry simulation aided by a CAD software.

Keywords: Area Model. Free Form. Finishing. Numerical algorithm.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de fresamento - a)tangencial concordante; b)tangencial discordante; c)frontal concordante; d)frontal discordante	19
Figura 2 – Fresamento concordante e discordante	19
Figura 3 – Parametros de usinagem geometricos e de velocidade	21
Figura 4 - Alterações do contato ferramenta-peça	23
Figura 5 – Centro da ferramenta em contato com a peça	24
Figura 6 – Área da seção transversal ao corte do cavaco no processo de torneamento	29
.....	
Figura 7 - Influência da espessura do cavaco na pressão específica de corte	30
Figura 8 – Pressão específica de corte em escalas logarítmicas.....	30
Figura 9 – Identificação das intersecções entre as superfícies que formam o cavaco	36
Figura 10 – Formação dos elementos de área (discretização da área)	37
Figura 11 – Visualização volume gerado pela intersecção entre as superfícies.....	38
Figura 12 – Aproximação do avanço por aresta para uma reta	39
Figura 13 – Parametrização da geometria do cavaco	40
Figura 14 – Espessura máxima da seção do cavaco	41
Figura 15 – Posição dos pontos triplos.....	42
Figura 16 – Sensores dos pontos triplos.....	43
Figura 17 – Visualização dos sistemas de coordenadas SCM e SCS.....	44
Figura 18 – Elemento de área em coordenadas esféricas	46
Figura 19 – Apresentação das variáveis angulares e radial.....	47
Figura 20 – Plotagem das equações	49
Figura 21 – Demonstração do ponto P_0	50
Figura 22 – Regimes de corte.....	55
Figura 23 – Validação (dados do CAD como marcadores).....	56
Figura 24 - Variação do avanço	57
Figura 25 - Variação da penetração de trabalho	58
Figura 26 - Variação da profundidade de usinagem.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Apresentação dos casos avaliados	54
Tabela 2 - Comparação dos dados obtidos com o CAD.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Comando Numérico Computadorizado
EDM	Electrical Discharge Machining
ISO	International Organization for Standardization
SCM	Sistema de Coordenadas da Máquina
SCS	Sistema de Coordenadas da Superfície
GPCAM	Grupo de Pesquisa de Manufatura Auxiliada por Computador
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Ângulo polar secundário [°]
β	Ângulo azimutal secundário [°]
ρ	Componente do raio em coordenadas cilíndricas
θ	Ângulo polar primário [°]
ϕ	Ângulo azimutal primário [°]
\hat{i}	Direção x no sistema de coordenadas
\hat{j}	Direção y no sistema de coordenadas
\hat{k}	Direção z no sistema de coordenadas
\hat{n}	Vetor normal a superfície
\hat{f}	Direção do avanço
\hat{g}	Direção do passe lateral
r	Vetor posição radial
k_s	Pressão específica de corte [kg/mm ²]
$k_{s,1}$	Pressão específica de corte para uma seção de 1mm ² [kg/mm ²]
a_p	Profundidade de usinagem [% do raio da ferramenta]
a_e	Penetração de trabalho [% do raio da ferramenta]
f_z	Avanço por aresta [% do raio da ferramenta]
s	Área da seção de corte [mm ²]
h	Espessura de seção de corte [mm]
b	Largura de corte [mm]
R_0	Raio da ferramenta [mm]
P_0	Ponto contido no plano, no eixo normal à superfície
v_c	Velocidade de corte [mm/min]
P_c	Força principal de corte [N]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO POR REMOÇÃO DE MATERIAL	17
2.1.1	Fresamento	18
2.1.2	Aspectos Qualitativos Do Fresamento	18
2.2	PARÂMETROS DE USINAGEM DO FRESAMENTO	20
2.2.1	Parâmetros geométricos.....	20
2.2.2	Parâmetros de velocidade	21
2.3	USINAGEM DE FORMAS COMPLEXAS	21
2.4	ALTERAÇÃO DO CONTATO ENTRE A FERRAMENTA E A PEÇA.....	23
2.5	MODELOS DE FORMAÇÃO DE ÁREA.....	24
2.6	FORÇAS NO PROCESSO DE USINAGEM	25
2.7	MODELOS DE FORÇA DE CORTE.....	26
3	METODOLOGIA.....	33
3.1	CONSIDERAÇÕES DO MODELO	33
3.2	VALIDAÇÃO DO MODELO.....	39
4	RESULTADOS	44
4.1	DEFINIÇÕES DO SISTEMA DE COORDENADAS.....	44
4.2	DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO DAS SUPERFÍCIES DO CAVACO	47
4.2.1	Esfera atual.....	47
4.2.2	Esfera da rotação anterior	48
4.2.3	Definição da equação do plano	49
4.2.4	Definição da equação do cilindro	51
4.3	DETALHAMENTO DA IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA	52
4.4	VALIDAÇÃO DO MODELO	53

4.4.1	Casos de corte.....	54
4.4.2	Validação das espessuras e áreas	55
4.5	Comportamento da área e da espessura em função dos parametros	57
5	Conclusão	61
	REFERÊNCIAS.....	62
	APÊNDICE A	65

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, na fabricação de produtos, o apelo estético para agradar clientes acarreta no emprego de superfícies elaboradas e complexas, com curvaturas suaves e contínuas. O fresamento é o principal processo de fabricação para manufatura de ferramentas com superfícies complexas e produtos acabados aplicado nas indústrias automotiva, aeroespacial, naval e de moldes e matrizes (CHEN;SHI, 2008). Dentre os possíveis processos de fabricação de formas complexas que são, fresamento, eletroerosão e manufatura aditiva, o fresamento é o mais utilizado, pois minimiza a quantidade de processos empregados na peça. Com um único equipamento pode-se chegar muito próximo da geometria final, além do custo ser relativamente menor entre os citados (SOUZA;ULBRICH, 2013).

Segundo Fallböhmer et al. (1996), a indústria automotiva é a grande consumidora de moldes, seguida pela eletrônica. Mais de 60% do tempo consumido na manufatura de moldes e matrizes é gasto em função da fabricação de peças funcionais que muitas vezes incluem cavidades. Para Kecelj et al. (2004), a cavidade é o componente mais representativo na manufatura de moldes, sendo responsável por cerca de 40% do tempo gasto para sua fabricação.

Este processo de fabricação se baseia em remover material de um bloco maciço utilizando uma ferramenta giratória com arestas de corte, que penetram o material, removendo material na forma de cavaco. Esta ferramenta pode se movimentar nas direções cartesianas em centros de usinagem que são controladas por um comando numérico computadorizado (CNC) (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2002).

A movimentação da máquina é programada através de um sistema CAM (*Computer Aided Manufacturing*) que utiliza um modelo tridimensional CAD (*Computer Aided Design*) para calcular as trajetórias da ferramenta. Buscando obter a geometria projetada, a peça passa por diferentes operações (SOUZA;ULBRICH, 2013).

Na operação de acabamento é utilizada uma ferramenta de ponta esférica para tirar um pequeno volume de material e suavizar a superfície. É a operação mais crítica, pois define a qualidade final da peça, bem como a rugosidade e tolerância geométrica (SOUZA;ULBRICH, 2013).

O erro de forma é essencialmente a diferença entre a superfície gerada pelo CAD e a geometria usinada. Além da deflexão, altas forças de usinagem podem causar vibração

extrema, causando marcas na peça e isto pode aumentar o tempo de polimento, processo subsequente do acabamento (SOUZA;ULBRICH, 2013).

A força de corte é a força gerada pelo contato da ferramenta com a peça, é a resultante entre forças axiais e radiais. As forças axiais causam aumento no desgaste da ferramenta e podem gerar mais estabilidade no processo, são ainda mais representativas quando o centro da ferramenta está em contato do material no momento do corte. Já as radiais causam a deflexão da ferramenta, uma vez que a ferramenta se deflete, a posição na qual é programada pelo programa CAM não é a mesma do real, deixando de remover material, causando o erro de forma (SOUZA;ULBRICH, 2013).

Devido à importância de conhecer as forças inerentes ao processo, alguns modelos de previsão de forças vêm sendo desenvolvidos. O primeiro modelo difundido foi o modelo de KIENZLE, que é baseado em relacionar a força com a área de seção transversal ao corte e uma constante que representa o comportamento de cada material, denominada “Pressão Específica” (k_s) (FERRARESI, 1970). O modelo de KIENZLE é aplicável com um bom nível de precisão para ferramentas cilíndricas de topo plano. Para a usinagem de formas complexas empregando ferramentas de ponta esférica, devido as alterações do contato ferramenta-peça, a área da seção transversal do cavaco se altera constantemente. Assim, precisão da estimativa da força de usinagem fica comprometida. Com base neste contexto, o presente trabalho propõe um modelo matemático capaz de identificar a seção transversal do cavaco discretamente ao longo da atuação de uma aresta de corte

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo geral desenvolver um modelo matemático semi-analítico para identificar a forma geométrica de um cavaco gerado no fresamento de geometrias complexas empregando uma fresa de ponta esférica. Além da geometria, o modelo deve identificar a área e seção transversal do cavaco. Estas informações serão utilizadas em trabalhos futuros em desenvolvimento pelo grupo de pesquisa GPCAM da UFSC – Joinville.

Foram considerados neste modelo inicial os parâmetros de usinagem, o diâmetro da ferramenta e a inclinação da superfície de trabalho. Assim, busca-se relacionar a posição da ferramenta com a peça e os parâmetros de profundidade de usinagem (a_p), penetração de trabalho (a_e) e avanço por aresta (f_z), com a área da seção transversal do cavaco não deformado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo esclarecer os principais conceitos relacionados ao modelo e revisar os estudos anteriores que são base para o desenvolvimento do modelo proposto.

Primeiramente serão explicitados os conceitos gerais de usinagem e definições de corte para o processo em questão, seguido de uma revisão dos modelos já propostos por outros autores com a mesma finalidade.

2.1 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO POR REMOÇÃO DE MATERIAL

O termo usinagem é o mais apropriado para fabricação em questão, representa um dos primeiros e principais processos de fabricação utilizados. Esta consiste basicamente na fabricação de um produto pela remoção de material excedente de um corpo primitivo e pode ser classificado como (SOUZA;ULBRICH, 2013):

Usinagem não convencional: A remoção de material pode ainda ser realizada por processos relativamente novos, tais como corte a laser, jato d'água e eletroerosão. Destaca-se dentre estes o processo de eletroerosão (EDM – *Electrical Discharge Machining*) que é baseado no princípio da remoção de material por efeito térmico através de uma descarga elétrica. É um processo muito utilizado quando a fresadora, torno ou retífica não conseguem remover o material. O processo emprega um eletrodo com a cópia fiel do produto. Este eletrodo pode ser de cobre ou grafite, dependendo do caso.

Usinagem convencional: Neste processo, uma ferramenta de corte realiza a remoção de material. Nesta classificação cabem os processos de torneamento, fresamento, furação e roscamento, dentre outros. Esses casos empregam ferramentas de corte com geometrias definidas. Por exemplo, em uma broca pode-se conhecer seu diâmetro, número de arestas de corte, ângulos de ação das arestas etc. Ainda na usinagem convencional, processos de retificação, lapidação e outros semelhantes são conhecidos por processos de usinagem convencional que emprega ferramentas de corte de geometria não definidas, pois as regiões de ação de corte em um rebolo, por exemplo, não são facilmente identificadas.

De maneira geral, dentre os processos de usinagem utilizando ferramentas com geometrias definidas, o fresamento é o mais empregado na fabricação de moldes, como detalhado a seguir.

2.1.1 Fresamento

Esta é a operação mais complexa quando comparada aos demais processos. A matéria-prima é fixada na mesa da máquina e a ferramenta (fresa) rotaciona e translada em até três eixos simultaneamente removendo material. Além das características de corte intermitente, o fresamento é o caso mais complexo de movimentação e, por este motivo, muitos casos requerem a utilização de sistemas CAM para a programação da usinagem. É importante salientar que em todos os processos de usinagem, ou movimentações de máquina, utiliza-se o método de coordenadas cartesianas, ou seja, os eixos X, Y e Z (SOUZA;ULBRICH, 2013).

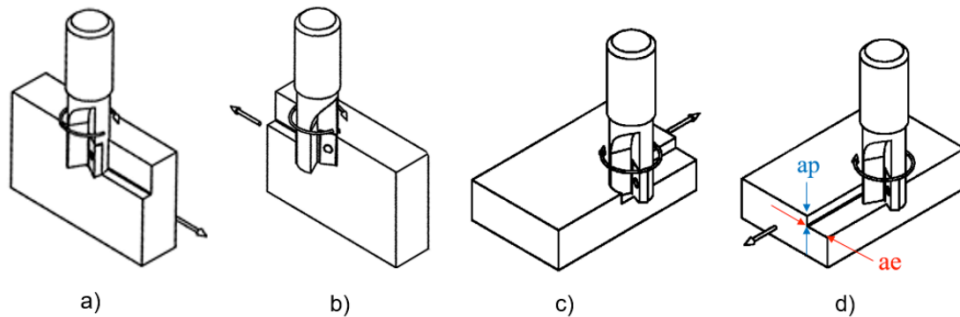
2.1.2 Aspectos Qualitativos Do Fresamento

No processo de fresamento destacam-se dois tipos básicos: fresamento tangencial e frontal (Figura 1) (ABNT NBR 6175:2015). O fresamento de formas complexa se concentra no segundo caso, mas a norma não faz menção à quantidade de eixos simultâneos movimentados no processo. Processos de acabamento usualmente movimentam três eixos simultaneamente.

O fresamento tangencial é a operação na qual os dentes ativos na superfície cilíndrica da ferramenta atuam sobre a peça, enquanto o eixo da fresa é paralelo à superfície que está sendo gerada. O fresamento frontal pode ser definido pela operação na qual os dentes ativos da fresa estão na superfície frontal da ferramenta, o eixo da fresa é perpendicular à superfície gerada. As fresas são chamadas de fresas frontais ou de topo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2002).

Na Figura 1 mostra os tipos de fresamento ainda podem ser classificados com relação à concordância e discordância, e será abordado na sequência: a) Fresamento tangencial concordante; b) Fresamento tangencial discordante; c) Fresamento frontal concordante; d) Fresamento frontal discordante.

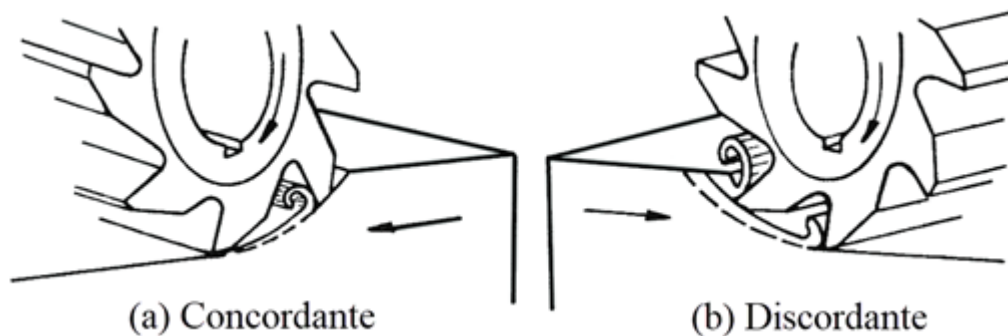
Figura 1 – Tipos de fresamento - a)tangencial concordante; b)tangencial discordante; c)frontal concordante; d)frontal discordante



Fonte: Dib *et al* (2015)

O sentido de movimentação entre a ferramenta e a peça também pode ser utilizado para classificar o processo em sentido de corte concordante ou discordante (SOUZA;ULBRICH, 2013). Sentido de corte concordante: a maior espessura do cavaco encontra-se no início do corte (Figura 2-a). Sentido de corte discordante: a maior espessura do cavaco encontra-se no final do corte (Figura 2-b).

Figura 2 – Fresamento concordante e discordante



Fonte: Ferraresi (1970)

Outras formas de fresamento também são normalizadas, como tangencial de perfil e composto de superfícies ortogonais.

As principais operações de fresamento são operação de desbaste e acabamento, são elas definidas por:

Desbaste: operações de fresamento que iniciam com um bloco prismático de material em estado bruto. Essa operação é executada em dois eixos e meio, pois a ferramenta posiciona-se em uma determinada profundidade em Z e depois realiza movimentos em dois eixos para a remoção de material deste respectivo nível. Quando a remoção de material é finalizada, a ferramenta se posiciona em uma nova profundidade em Z (definida pela

profundidade de usinagem), remove o material desse plano, repetindo o processo até a conclusão do desbaste. Normalmente, deixa-se um sobremetal para ser removido na operação final de acabamento (SOUZA;ULBRICH, 2013).

Acabamento: essa operação visa remover todo material excedente das operações anteriores de desbaste e obter melhor qualidade superficial.

Estas operações podem ser encontradas na norma ABNT NBR 6175:2015. Para identificar os parâmetros de corte na usinagem por fresamento, o usuário deverá identificar características em duas dimensões: parâmetros geométricos e parâmetros de velocidade. Estes temas serão abordados a seguir.

2.2 PARÂMETROS DE USINAGEM DO FRESAMENTO

Segundo a norma ABNT NBR ISO 3002-1:2013 os movimentos, direções e velocidades do processo de usinagem são definidos em relação à peça. Diniz, Marcondes e Coppini (2013) explicam que esse procedimento é adotado para padronização dos sinais algébricos e facilitação do estudo de movimento.

2.2.1 Parâmetros geométricos

São grandezas que descrevem geometricamente a relação de penetração entre a ferramenta e a peça. Estes parâmetros envolvem a profundidade de corte no sentido axial e radial da ferramenta bem como o avanço por aresta, definidos a seguir. Estes parâmetros são fornecidos pelos fabricantes de ferramentas de corte sempre com uma faixa de valores cuja aplicação depende do material a ser usinado. A Figura 3 exemplifica os parâmetros.

a) Profundidade de corte no sentido axial (a_p)

É a profundidade de penetração da ferramenta em relação à peça medida perpendicularmente ao plano de trabalho.

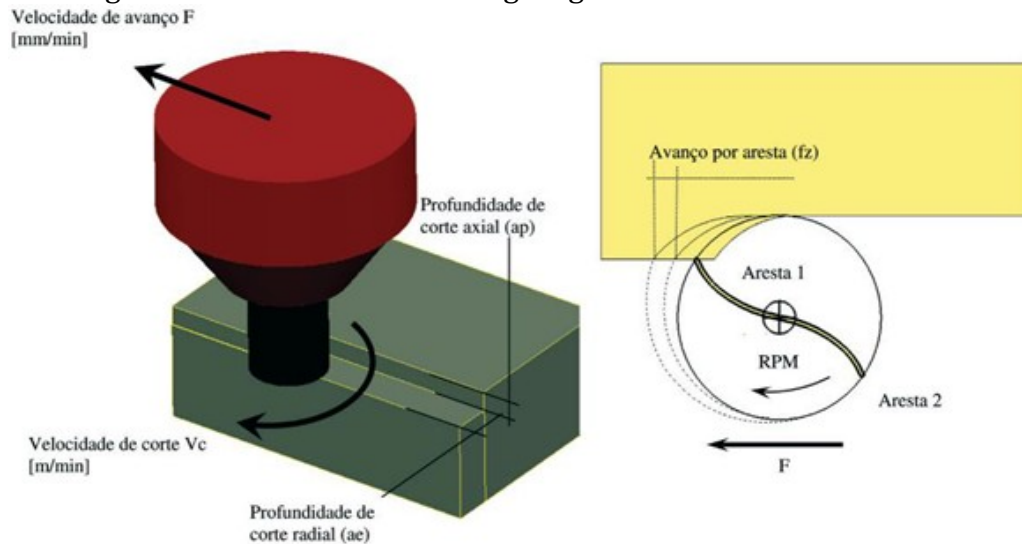
b) Profundidade de corte no sentido radial (a_e)

É a penetração da ferramenta em relação à peça medida perpendicularmente à direção de avanço.

c) Avanço por aresta (f_z)

É a distância consecutiva entre duas atuações da aresta de corte na direção do avanço.

Figura 3 – Parametros de usinagem geometricos e de velocidade



Fonte: Souza e Ulbrich (2013)

2.2.2 Parâmetros de velocidade

Os parâmetros que se relacionam com a velocidade são:

- a) Velocidade de avanço. É a velocidade escalar da ferramenta na direção da movimentação da mesma.
- b) Velocidade de corte. É a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta. Pode ser expressa pelo produto entre a velocidade angular e o raio da ferramenta.

2.3 USINAGEM DE FORMAS COMPLEXAS

Souza e Ulbrich (2013) definem geometrias complexas como aquelas não passíveis da representação matemática convencional, como retas e circunferências ou geometrias tridimensionais primitivas como formas cúbicas, esféricas, toroidais, cônicas, planas e cilíndricas. São geometrias que alteram a curvatura ao decorrer da entidade de forma não uniforme, sendo que cada ponto possui um raio de curvatura distinta e independente dos

adjacentes, tendo o termo spline como referência para o equacionamento matemático da curva complexa. Estas formas complexas são amplamente encontradas nos setores de moldes e matrizes, aeronáutica, aeroespacial e biomedicina. Estes setores encontram dificuldades como a complexidade das peças, alta dureza dos materiais usinados (GONZALO, *et al.*, 2008).

As dificuldades encontradas na fabricação dessas geometrias, contendo: pequenos raios entre as superfícies adjacentes; paredes verticais; áreas com elevadas profundidades de corte e difícil acesso; variação de volume de material a ser removido; e a constante alteração do ponto de contato entre a ferramenta de corte e a peça, devido às diversas alterações de curvatura da superfície. Estas características geométricas tornam a fabricação de moldes e matrizes uma tarefa árdua, com grandes ineficiências, pois é difícil se obter a qualidade superficial requerida nesta aplicação, utilizando operações de usinagem (SOUZA;ULBRICH, 2013).

Na manufatura de moldes e matrizes e outras indústrias, formas complexas são usinadas em aços de alta dureza. Para estas aplicações as tolerâncias de fabricação são muito justas, normalmente entre 0,05-0,1 mm para matrizes de estampagem e menores do que 0,04 mm para moldes para injeção. Durante a usinagem destas formas complexas, existem erros de forma provenientes da deflexão da ferramenta ou distorções da máquina inteira (ferramenta, porta ferramentas e a estrutura da máquina) causadas pela ação das forças de corte (LAMIKIZ, *et al.*, 2004).

A utilização de ferramentas de ponta esférica para usinagem Comando Numérico Computadorizado (CNC) de formas complexas é a mais utilizada para operações de alta precisão. Para aplicação na fabricação de moldes e matrizes, a rugosidade média deve estar abaixo de 0,63 μm . Como é a operação mais demorada, é importante prover alta eficiência para fabricação de formas complexas, portanto é necessário reduzir a quantidade de operações de acabamento como o polimento, esta pode durar de 10 a 35 por cento de todo tempo de fabricação da cavidade, normalmente demoram de 7 a 10 vezes o tempo de uma operação de acabamento com uma fresadora CNC (SHAMINA; BELOUS; OGOL, 2014).

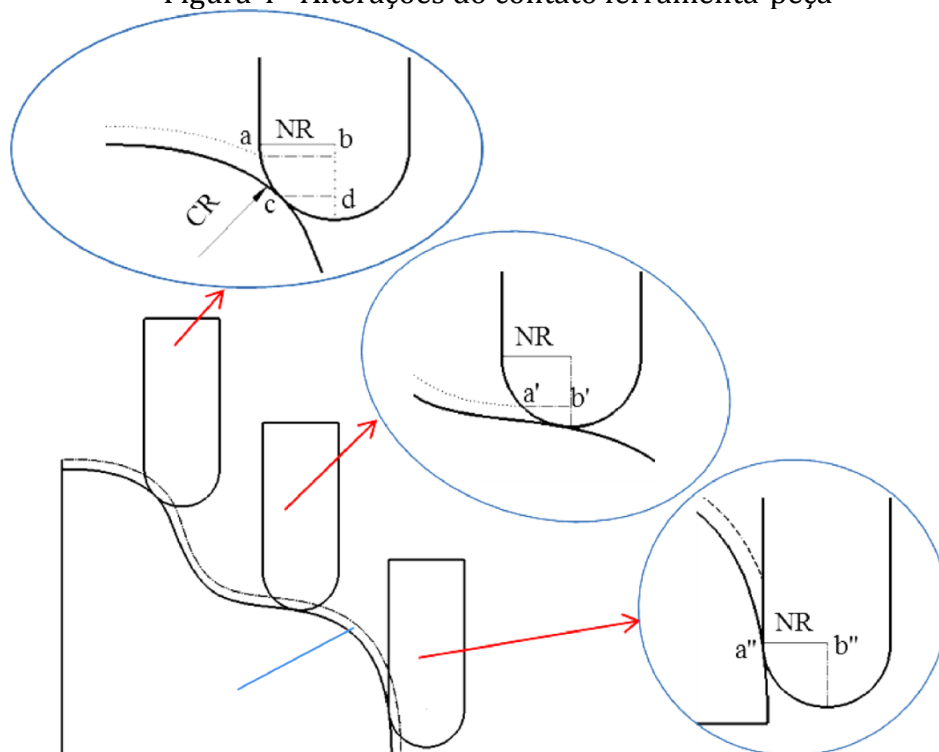
Operações de acabamento são caracterizadas por uma baixa remoção de material e por dar a forma final da geometria. No acabamento de superfícies complexas são empregadas fresas de ponta esférica, por propiciar melhor condição de corte.

2.4 ALTERAÇÃO DO CONTATO ENTRE A FERRAMENTA E A PEÇA

No processo de usinagem de superfícies livres com centro de usinagem de três eixos, ferramentas de ponta esférica promovem uma aproximação eficiente de superfícies curvas devido à alta robustez e simples operação. Entretanto a área de contato entre a ferramenta e a peça, bem como a velocidade de corte estão em constante mudança durante uma usinagem, o que leva a severas oscilações da força de corte. A variação da força de corte afeta a qualidade da superfície usinada além de reduzir a vida útil da ferramenta. Pode ser verificado que tanto a magnitude da força de usinagem quanto à vibração são menores para condições de corte ascendentes do que para trajetórias descendentes, portanto, obtendo uma melhor qualidade de usinagem além de prolongar a vida útil da ferramenta (JIAN-WEI, *et al.*, 2017).

Portanto, uma característica peculiar deste processo de usinagem, e que o distingue dos demais processos, é a constante alteração da região de contato da ferramenta com a peça, como ilustra a Figura 4.

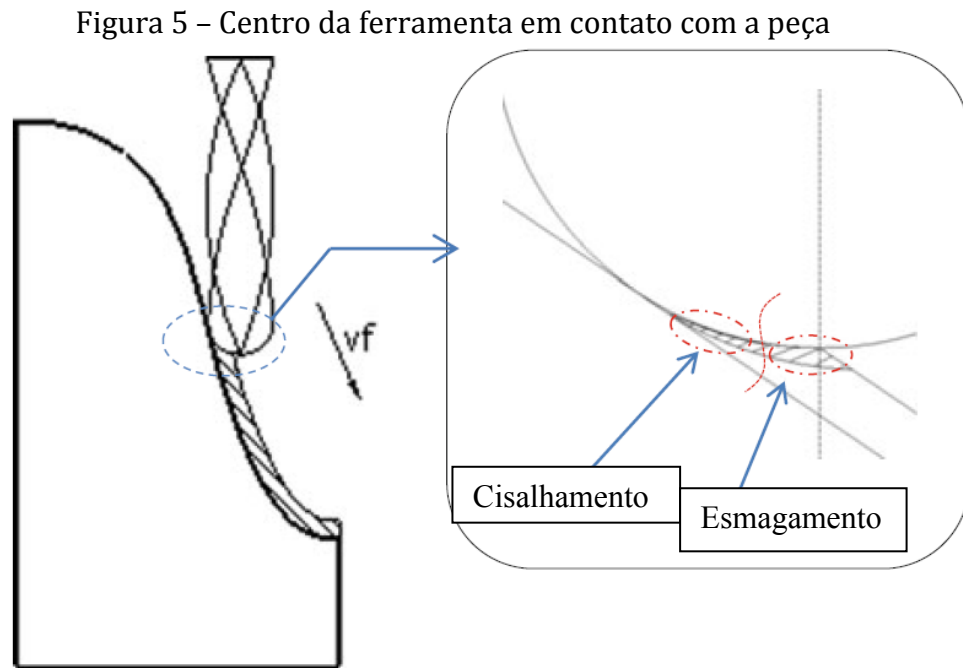
Figura 4 - Alterações do contato ferramenta-peça



Fonte: Souza *et al* (2015)

Este fato torna o processo mais complexo, pois o diâmetro da ferramenta se altera, alterando a velocidade de corte, a qual pode atingir um valor nulo, quando o centro da

ferramenta se encontra na região de corte. Nesta região, não ocorre o corte pode cisalhamento predominantemente, mas sim, uma deformação plástica também conhecida pelo termo “*ploughing*” e severas oscilações da força de usinagem podem ser observadas (SOUZA, et al, 2014). A Figura 5 exemplifica esta situação.



Fonte: Souza *et al* (2014)

Foi verificado que os elementos de área que compõem a aresta da ferramenta variam de acordo com a inclinação da ferramenta, obtendo diferentes raios efetivos de corte para cada inclinação. Desta forma podendo influenciar na temperatura, nas forças de corte e na tensão residual da superfície da peça, o que caracteriza a integridade da mesma (XIAO XIAO, *et al.*, 2011). Neste âmbito, um dos parâmetros que definem a qualidade do corte é a força no decorrer do corte.

2.5 MODELOS DE FORMAÇÃO DE ÁREA

A espessura do cavaco é um dos parâmetros mais fundamentais no processo de fresamento, pode afetar a força de corte, o aporte térmico, a estabilidade do corte e a qualidade superficial. De forma geral grande parte dos modelos de espessura são dependentes de duas considerações, uma relacionada com a decomposição da translação da ferramenta e

rotação seguindo raras esféricas, e outra considerando o desacoplamento dos parâmetros que formam o cavaco. (LIANG, 2011).

Muitos modelos utilizam métodos de grades de discretização de três dimensões, ou construções geométricas com sólidos e operações booleanas. Ainda são descritos métodos utilizando Z-map, que pode eliminar erros circunferenciais. (LIANG, 2011)

A trajetória da aresta da ferramenta pode ser definida considerando os ângulos de inclinação da peça, avanço por aresta, profundidade de usinagem e penetração de trabalho, além dos ângulos de posição que se quer avaliar, ainda é possível levar em consideração o batimento da ferramenta (LOTFI, *et al.*, 2018). Foi possível desenvolver um modelo de espessuras considerando a abordagem de corte contínuo (KO, 2001).

É possível separar os domínios e regiões da área da seção transversal ao corte, desta forma visualizando as regiões que devem ser integradas para a obtenção da área em questão. Uma abordagem com sistemas de coordenada esféricas pode ser empregado para avaliar as espessuras em cada ponto da área da seção (TERAI, *et al.*, 2004).

2.6 FORÇAS NO PROCESSO DE USINAGEM

A tarefa básica de um processo de manufatura é promover características específicas de qualidade, nos valores determinados com o melhor custo benefício. Todo processo de manufatura é afetado por distúrbios variáveis, que podem ser provenientes de fatores externos e internos (ocorrendo internamente ao processo). Por esta razão, a descrição funcional das propriedades dos componentes é fornecida com tolerâncias. Portanto, as características funcionais devem ser testadas tanto no decorrer da fabricação quanto no final. Os distúrbios que devem ser levados em consideração com relação a possíveis causas dos defeitos são: distúrbios causados por forças estáticas, como deformação da peça de trabalho pelos dispositivos de fixação; distúrbios causados pelas forças dinâmicas que geram oscilações; distúrbios causados por influências térmicas, como geração de calor do processo ou internamente à ferramenta; e distúrbios causados pelo revestimento da ferramenta (KLOCKE, 2011).

A força de corte é proveniente do contato entre a ferramenta e o material, uma vez que o movimento da ferramenta é rotacional; este contato é dinâmico, gerando uma variação na área de contato entre a ferramenta e o material. Tal variação causa uma oscilação na força

de corte, dado que a força de contato tem uma relação direta com a área e a pressão ponto a ponto (LAMIKIZ, *et al.*, 2004).

Uma maneira de prever o acabamento superficial e as tolerâncias geométricas é conhecer a força de corte gerada no processo de usinagem. A força de corte indica as vibrações da ferramenta durante o corte, que está diretamente ligada à qualidade superficial. As forças podem indicar também a vida útil da ferramenta, dado importante para as empresas do setor de fabricação (LAMIKIZ, *et al.*, 2004).

Esta força pode ser expressa por um modelo matemático, o mais tradicional, realizado por KIENZLE, resultante do produto entre a área da seção transversal do cavaco, não deformado pela pressão específica de corte (k_s) que é intrínseca ao material a ser usinado (FERRARESI, 1970).

Este grupo de causas possíveis também inclui distúrbios causados pela cinemática do engajamento entre a ferramenta e a peça, levando a desvios no corte durante o fresamento ou causado marcas sistemáticas na peça que causam efeitos ópticos de difração na peça.

Wojciechowski (2015) afirma que modelos mecânicos podem ser classificados em dois grupos, no primeiro considera os efeitos de cisalhamento devido à formação do cavaco na aresta da ferramenta e *ploughing* na extremidade inferior da ferramenta utilizando um coeficiente de corte específico para cada componente da força gerada no corte. O segundo considera os efeitos de cisalhamento e *ploughing* são caracterizados separadamente.

Fu et al (2016) afirmam que forças de corte são normalmente calculadas métodos mecânicos ou numéricos que são considerados lentos e impraticáveis para várias condições de corte e vários pares de ferramenta com a peça. Relata que a distribuição da força instantânea é irregular e é causada pela variação de espessura ao longo do cavaco.

Souza et al. (2014) investigaram a usinagem de uma superfície semicilíndrica para representar uma superfície livre. Foi analisada a influência da velocidade de corte nas forças de corte, qualidade superficial e formação do cavaco. Verificaram que quando a ferramenta tem o centro no corte, o fenômeno de remoção de material se divide em dois: cisalhamento e esmagamento. O processo se torna instável quando o centro se encontra em contato com a peça.

2.7 MODELOS DE FORÇA DE CORTE

Rubeo e Schmitz (2016) propôs adaptar as equações de previsão de forças de corte axial, tangencial e normal, por meio de coeficientes que multiplicam a área de corte para cada uma das três situações. O modelo foi aplicado para obter a força de corte instantânea e a força média de corte. O autor encontra os coeficientes de corte por meio de regressão linear e não linear. Apontou-se que parâmetros de usinagem como avanço por aresta e penetração de trabalho, que delimitam a área de corte, apresentam uma não linearidade com os coeficientes de forças de cortes.

Fu et al. (2016) propuseram um modelo de força analítico, considerando batimento na ferramenta, o modelo é calculado através de um somatório de segmentos e, portanto, é realizado com auxílio de um software. Para esse foi verificado efetividade na precisão de forças instantâneas de corte. O autor considera no modelo proposto os parâmetros de entrada, velocidade de rotação, avanço por aresta, profundidade de usinagem e diâmetro da ferramenta, o que difere do modelo proposto que leva em consideração todos os parâmetros que delimitam a região de corte e inclinação da superfície de trabalho.

Wojciechowski (2015) propõem um modelo de forças preciso, para operações de acabamento com ferramenta de ponta esférica. O autor utiliza um modelo mecanístico que utiliza um sistema curvilinear normal à região de contato da ferramenta para determinar a força resultante agindo em uma fração infinitesimal da aresta de corte. Entretanto o autor realiza os estudos somente para corte em cheio, o qual é pouco empregado em casos práticos.

Lamikiz (2004) propõem um modelo de forças de corte instantâneo para condições de corte usuais para superfície inclinada utilizando um modelo semi-mecanístico, foi obtido primeiramente a posição da aresta de corte discretizando a mesma e considerando o ângulo de hélice variável. Foi definida uma expressão para descrever a posição da aresta de corte em função do ângulo de rotação da ferramenta, o ângulo de posição de cada elemento de área e o raio da ferramenta. Com a posição de cada elemento pôde descrever o comprimento de cada posição ao longo da aresta e assim definir a espessura do cavaco não deformado. O trabalho contribuiu muito para o entendimento da discretização da aresta de corte, contudo, o autor não apresentou os resultados do estudo para o caso de usinagem descendente com a utilização do método para previsão, sendo que este caso é o que apresenta maiores forças, por conta de o centro da ferramenta estar em contato com a peça.

Karpuschewski (2007) adaptou a equação de KIENZLE primeiramente levando em conta diferentes velocidades de corte, aprimorando a equação de KIENZLE para uma usinagem feita com ferramenta de ponta esférica, definindo uma relação entre espessura de

corte, largura do cavaco e velocidade de corte em função do ângulo de contato da ferramenta com a peça. O autor identificou que a relação entre a largura do cavaco e o ângulo de contato φ não é proporcional e que a força de corte diminui com o aumento da velocidade de corte. Porém, o autor não validou o modelo de força proposto com teste real de aquisição de forças.

A força de corte pode ser definida para ferramentas cilíndricas através do modelo de KIENZLE, neste é utilizado uma média da espessura do cavaco para avaliar a força média de corte durante uma atuação da aresta de corte. Neste caso avaliando o domínio de corte do material, pode-se perceber que a área da seção transversal ao corte é sempre retangular ou paralelogrâmica no caso de ferramenta com inclinação. Neste caso o comprimento de corte, que é a base da área do cavaco, é fixo e a espessura varia. Desta forma, se fez necessário definir a espessura média do cavaco em função do raio da ferramenta, e dos parâmetros passo lateral e avanço por aresta (FERRARESI, 1970).

Segundo Ferraresi (1970), a força de corte pode ser expressa pela relação:

$$P_c = k_s \cdot s \quad 1$$

Onde:

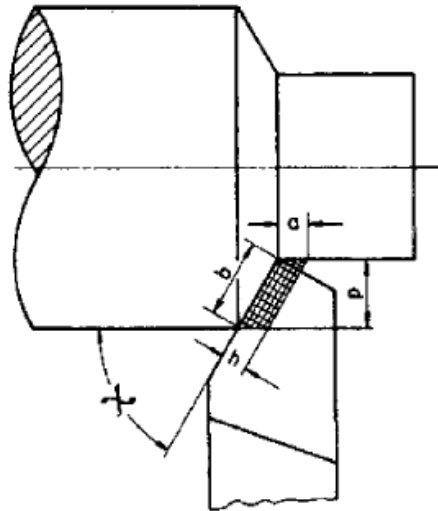
s = área da secção de corte

k_s = pressão específica de corte, isto é, a força de corte para a unidade de área de secção de corte (FERRARESI, 1970).

A área da secção de corte é dada pelo produto da profundidade ou largura de corte, com o avanço a_e , pode ser observada na Figura 6. Em ferramentas sem arredondamento da ponta da aresta cortante tem-se:

$$s = p \cdot a_e = b \cdot h \quad 2$$

Figura 6 – Área da seção transversal ao corte do cavaco no processo de torneamento



Fonte: Ferraresi (1970)

Experimentalmente foi possível verificar que a pressão específica de corte depende do material da peça, e que a composição química do material exerce notável influência sobre o valor de k_s , assim para os aços carbono e aços de corte fácil. O aumento da porcentagem de carbono acarreta em um aumento da pressão específica de corte, porém o aumento de outros elementos de liga pode diminuir o valor de k_s (FERRARESI, 1970).

A Figura 7 mostra a representação gráfica do valor k_s em função da espessura h para um determinado par ferramenta peça. Passando-se à representação para um sistema de coordenadas bilogarátmicas (Figura 8), verifica-se que os pontos se alinham numa reta, a qual permite estabelecer a equação 3.

$$y = b + mx \quad 3$$

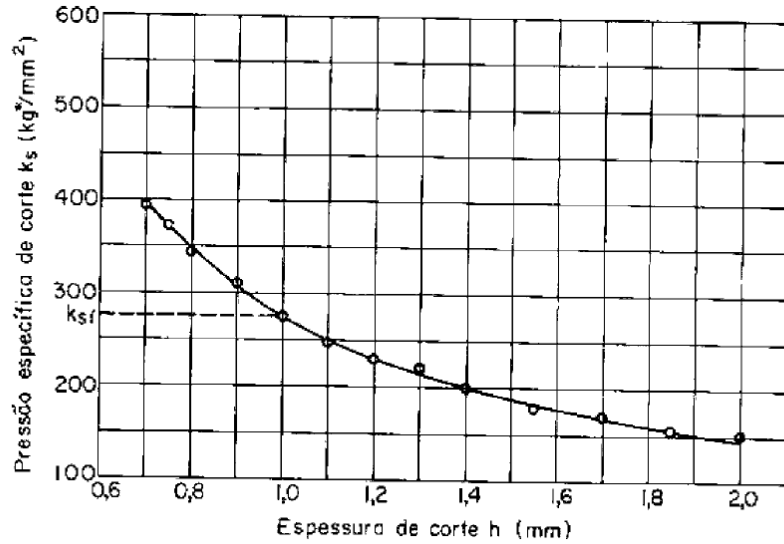
$$\log k_s = \log k_{s1} - z \log h \quad 4$$

Onde k_{s1} é a constante específica do metal para uma seção de corte de 1mm de espessura por 1mm de largura e z é o coeficiente angular da reta. Portanto a força principal de corte pode ser escrita de acordo com a equação 6, substituindo a equação 5 na equação 6.

$$k_s = \frac{k_{s1}}{h^z} \quad 5$$

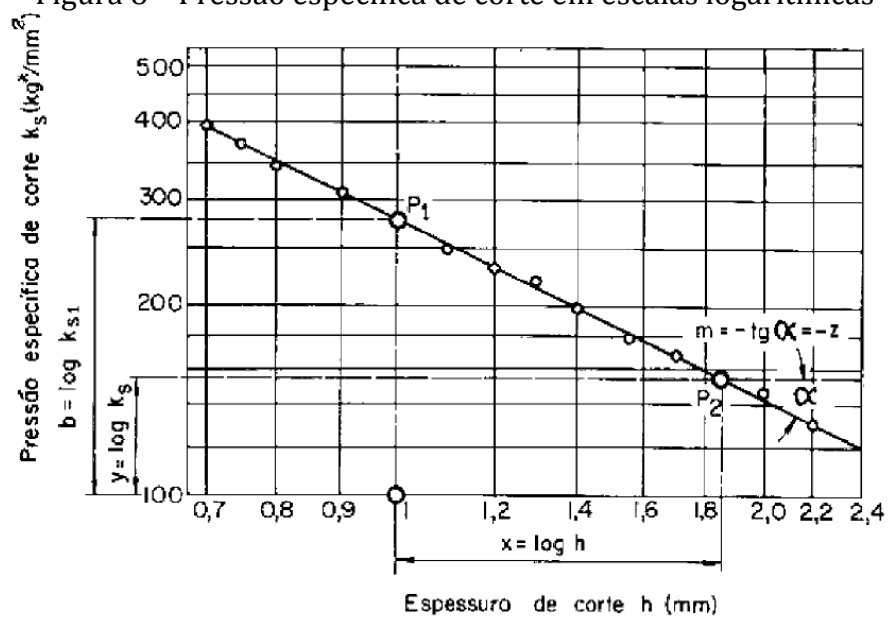
$$P_c = k_s h b = k_{s1} b h^{1-z} \quad 6$$

Figura 7 - Influência da espessura do cavaco na pressão específica de corte



Fonte: Ferraresi (1970)

Figura 8 - Pressão específica de corte em escalas logarítmicas



Fonte: Ferraresi (1970)

Com os parâmetros h - “espessura média” e b - “largura de corte” definida, pode-se calcular a força de corte através da equação 6.

O comportamento da pressão específica em função da espessura pode ser representado por uma função logarítmica, essa relação foi encontrada a partir de ensaios

experimentais, onde a espessura foi variada e medida o valor de força para cada valor de espessura. Também foram testadas essas relações para diferentes materiais e, para cada um, definido uma pressão específica padrão para uma espessura de 1mm.

Desta forma, Kienzle propôs, a fim de facilitar a utilização dos valores obtidos nos experimentos, apresentar os dados em escala logarítmica. Assim, os dados podem ser representados por uma reta. Logo, é apenas necessário definir um ponto e uma inclinação para definir o valor de k_s para qualquer espessura.

Sendo assim no intuito de estabelecer uma relação direta entre os parâmetros geométricos e de velocidade com as forças de usinagem, o estudo foi idealizado necessitando de softwares para obter o resultado.

O estudo tem como objetivo desenvolver um modelo de áreas transversais ao corte, relacionadas à posição que a ferramenta se encontra em relação ao material a ser removido.

Para realizar o modelo serão utilizadas superfícies vetoriais facilitando o movimento relativo da ferramenta e a peça.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo será abordada a metodologia utilizada para desenvolver o modelo matemático utilizado no presente estudo. Perante a necessidade da proposta devem ser explicitadas as considerações utilizadas para compor o método, bem como os métodos de validação do modelo. Também serão abordadas as limitações do modelo e a escolha das variáveis de entrada, que foram variadas dentro dos casos de maior ocorrência em aplicações industriais, tornando assim aplicável para grande parte das operações de usinagem de acabamento

Para desenvolver o modelo proposto, foi realizado um estudo geométrico para identificar os elementos que definem o cavaco, para sua posterior descrição matemática. Para tanto foi realizado uma simulação geométrica via software CAD da formação do cavaco. Os procedimentos utilizados nas realizações das tarefas são apresentados a seguir.

- a) Estabelecer um sistema de coordenadas adequado para descrever a geometria da ferramenta com como seu movimento em relação à peça.
- b) Estabelecer um segundo sistema de coordenadas adequado para descrever a orientação espacial da peça em relação à ferramenta, em função dos parâmetros de usinagem, f_z , a_e , a_p e \hat{n} .
- c) Modelar geometricamente as superfícies que delimitam o volume do cavaco e determinar expressões matemáticas.
- d) Determinar os valores do domínio do volume do cavaco.
- e) Determinar os valores de transição entre os subdomínios correspondentes às diferentes geometrias superficiais do cavaco.
- f) Determinar a área transversal instantânea à aresta de corte, e a espessura máxima correspondente, para qualquer posição do ângulo θ de rotação da ferramenta.
- g) Validar o modelo via comparação dos valores de área implementada com a área medida no CAD.

3.1 CONSIDERAÇÕES DO MODELO

Para que seja possível modelar uma geometria tridimensional que representa o cavaco teórico não-deformado é necessário assumir alguns princípios. Primeiramente, foi

considerado que a ferramenta atua sobre o material em dois tempos, o que significa que durante a atuação da ferramenta a mesma não possui velocidade de avanço. Desta forma, a atuação de uma rotação da aresta de corte, pode ser representado por um hemisfério. Outra consideração relevante é que o caminho da ferramenta sobre a superfície da peça remove todo o material por onde passa, resultando em um formato cilíndrico. Por fim, a superfície da peça é plana e desconsidera a curvatura complexa da mesma, por outro lado essa curvatura pode ser incluída no modelo pela inclinação entre a ferramenta e a peça, pois para qualquer condição de usinagem, pode-se associar um vetor normal à superfície em um dado instante. Em outras palavras, uma superfície complexa pode ser tratada como superfícies planas por partes.

O estudo geométrico da formação do cavaco considerado no desenvolvimento do modelo matemático é o método de simulação de corte não contínuo. Este método considera que a posição da ferramenta se altera de forma incremental a cada atuação da aresta (KO, 2001). Desta forma o cavaco é formado pela subtração de duas esferas subsequentes, distantes f_z na direção de avanço.

O erro associado a este método aumento proporcional ao avanço por aresta. Contudo, este método é conveniente para obter os dados de uma única revolução (KO, 2001). Visto que a proposta de modelo necessita de dados de cada atuação da ferramenta, e considerando que nas operações de acabamento o avanço por aresta é reduzido, este método foi utilizado na descrição matemática realizada.

Para representar este modelo, a geometria da ferramenta e da peça de trabalho deve ser expressa matematicamente. Uma forma de descrever a geometria da ferramenta é pela equação de uma esfera e, a superfície da peça de trabalho pode ser descrita por um plano.

Em operações de fresamento usuais, diversas passadas da ferramenta são realizadas durante sua trajetória a fim de atingir a geometria final. Logo, o modelo deve considerar a atuação remanescente da ferramenta para a delimitação da geometria da peça, após uma sequência de passadas. Tal superfície pode ser expressa por um cilindro, cujo eixo se encontra deslocado uma distância a_e da origem. A Figura 9 exemplifica a geometria gerada pela movimentação da ferramenta em uma peça.

Estas superfícies quando expressadas de forma matemática apresentam domínios livres dentro de cada uma. Por exemplo, a equação da esfera anterior (representação da última atuação da aresta da ferramenta na direção contrária ao avanço) está descrita para um ângulo polar $0 \leq \phi \leq 90^\circ$ e um ângulo azimutal $0 \leq \theta \leq 360^\circ$, contudo o cavaco esta limitado pelas

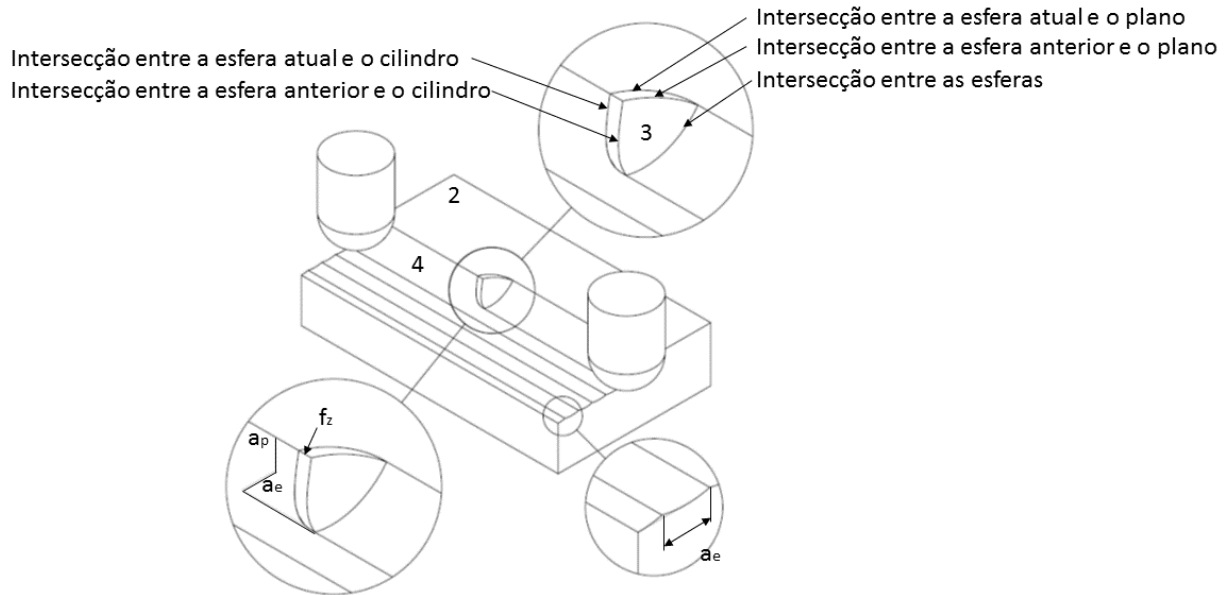
interseções com as outras superfícies, de modo que é necessário determinar os valores limites do domínio que contém o cavaco. Desta forma é necessário encontrar as interseções de cada par de superfícies.

Para a formulação matemática, todas as superfícies devem ter a mesma origem, e a escolhida foi no centro da esfera atual (representando a posição da ferramenta no instante do contato da aresta com a peça), desta forma foi definido que a esfera que está deslocada f_z na direção contrária ao avanço é a esfera anterior e na região interna a esta superfície não existe material. O plano é definido a uma distância $R_0 - a_p$ na direção normal à superfície da peça em que R_0 é o raio da ferramenta. O cilindro foi anteriormente descrito e está representado na Figura 9.

As interseções entre cada uma das superfícies são apontadas na Figura 9 – Identificação das intersecções. Estas irão definir e exemplificar por quais superfícies a espessura de corte está sendo formada. Os nomes de cada curva são dados de acordo com as superfícies que a formam (interseção entre as esferas, interseção entre a esfera anterior e o plano, interseção entre a esfera atual e o plano, interseção entre a esfera anterior e o cilindro e interseção entre a esfera atual e o cilindro). Desta forma será possível visualizar o comportamento do cavaco e avaliar quando ocorre uma transição de formato da área da seção transversal.

Para facilitar o entendimento de quais superfícies estão interagindo, foi desenvolvido um sistema de nomenclatura para as superfícies e arestas. Posteriormente esta será utilizada dentro da implementação para identificar em que região o código está atuando. Cada uma das quatro superfícies recebem um número (esfera atual – 1; plano – 2; esfera anterior – 3; cilindro – 4). Desta forma uma interseção entre a rotação atual, a rotação anterior e o plano recebe o nome 123.

Figura 9 – Identificação das intersecções entre as superfícies que formam o cavaco



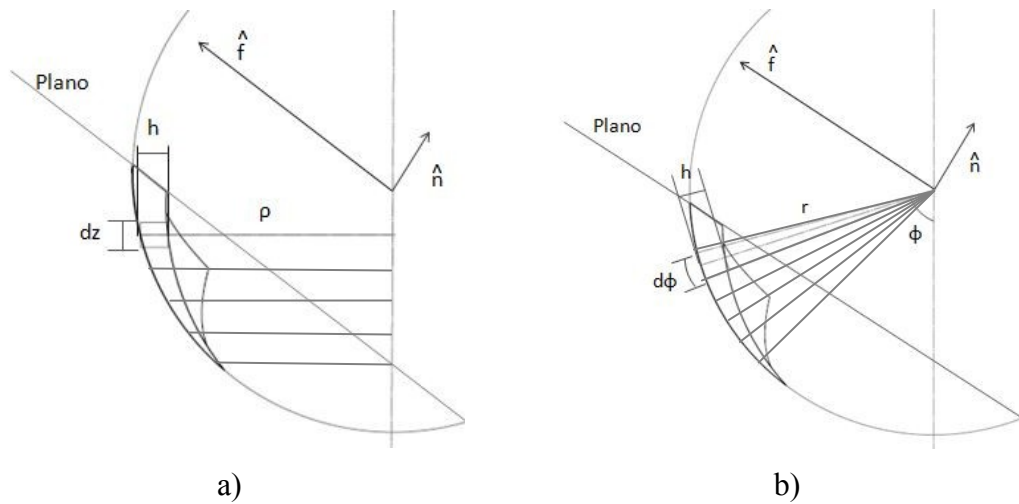
Fonte: Autor (2019)

O volume identificado entre as na Figura 9. é limitado pelas superfícies de duas esferas, o plano e o cilindro lateral. Este volume representa o cavaco gerado na atuação de um gume da ferramenta.

Para o equacionamento foi escolhido utilizar uma formulação baseada nas direções de movimentação da ferramenta, descrita por uma base vetorial conveniente. Das opções possíveis, coordenadas esféricas se adequam melhor pois a equação da esfera atual pode ser descrita apenas pelo valor do raio da ferramenta, que em qualquer posição das direções angulares, assume o valor do próprio raio. Uma vez definidas em coordenadas esféricas se as superfícies forem transformadas para outro sistema de coordenadas, o desenvolvimento fica mais simples de ser determinado.

Pode-se observar que se a área da seção transversal for definida por equações esféricas, a grade de formação da mesma tem uma disposição radial, o que para a definição da área é suficiente e pode ser visto na Figura 10 a).

Figura 10 – Formação dos elementos de área (discretização da área)



Fonte: Autor (2019)

Entretanto podemos perceber que um diferencial de área formado por este sistema de coordenadas pode assumir uma diferença no raio efetivo de corte, uma vez que o elemento de área está inclinado em relação ao plano de rotação da ferramenta.

A modelagem tem por objetivo relacionar a influência da área na força de corte. Na revisão da literatura foi possível notar que a velocidade de corte influencia fortemente nas forças geradas pelo mesmo, bem como no desgaste da ferramenta. É importante considerar que um elemento de área possui uma única velocidade de corte v_c , o que é determinado pelo raio efetivo de corte de cada elemento. A comparação entre as grades pode ser observada na Figura 10. Nota-se que para um elemento de área formado por uma grade em coordenadas esféricas, promove um elemento de área com diferentes raios efetivos de corte.

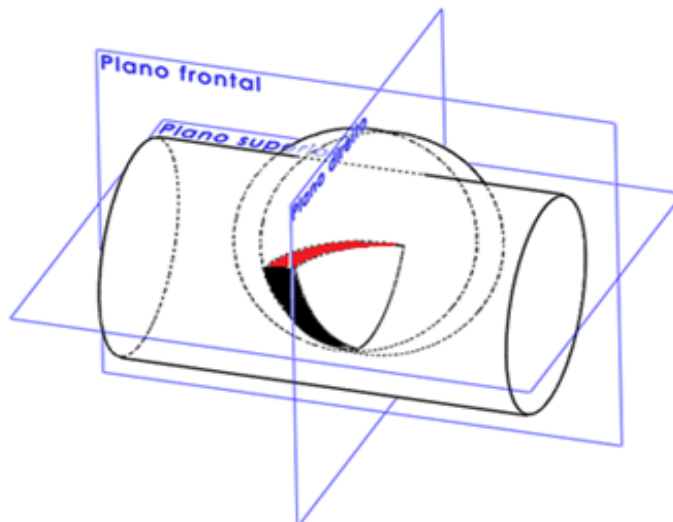
Com coordenadas cilíndricas pode-se notar que um elemento de área possui o mesmo raio efetivo de corte, se tomarmos que o refinamento de malha pode ser dado pela integral na direção z , podemos refinar o resultado para obter a área. A Figura 10 b) demonstra um elemento diferencial de área gerado utilizando coordenadas cilíndricas.

Para melhorar a modelagem, adotou-se um segundo sistema de coordenadas cilíndricas, pois se adequa melhor à teoria de Kienzle, sendo que cada elemento possui uma única espessura. Uma vez que temos a definição de todos k_s , podemos aplicar a teoria para cada elemento de área separadamente e obter um diferencial de força correspondente a um

diferencial de área, de forma possível a obter uma força total gerada em uma seção do corte, de maneira mais precisa.

Sucintamente, a modelagem da geometria do cavaco foi definida pela intersecção entre duas esferas, o plano da peça e um cilindro. As duas esferas representam as posições da ferramenta em dois tempos, uma no corte anterior (esfera anterior) e outra na posição subsequente (esfera atual), o plano que limita estas superfícies é o plano efetivo de trabalho (superfície da peça de trabalho) e o cilindro representa o caminho que a ferramenta percorreu na trajetória anterior, na direção do passo lateral. A disposição de cada superfície é demonstrada na Figura 11.

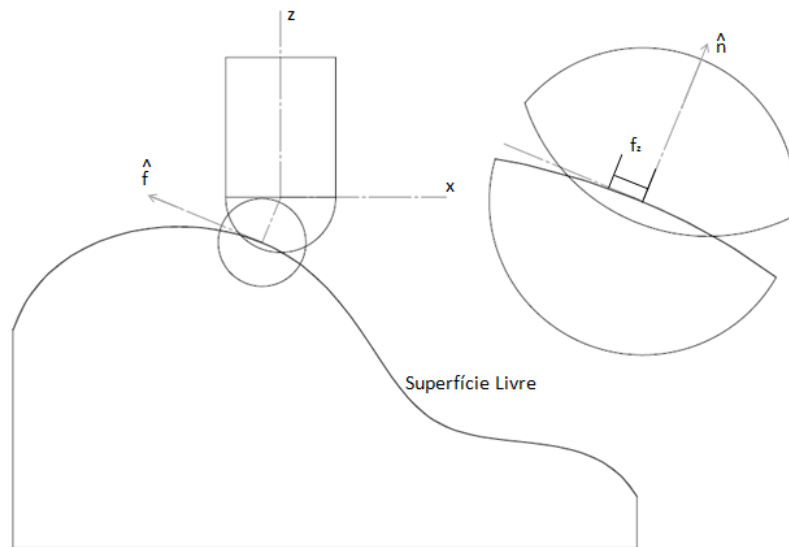
Figura 11 – Visualização volume gerado pela intersecção entre as superfícies



Fonte: Autor (2019)

Uma superfície complexa pode ser aproximada por um plano osculador, no caso em que se analisa instantaneamente o contato entre a ferramenta e a superfície. Este plano pode estar em qualquer direção e ser definido por um vetor normal à superfície no ponto de contato. Uma vez que o avanço por aresta assume valores de baixa magnitude, a curvatura da superfície complexa se aproxima de um segmento de reta demonstrado na Figura 12. Desta forma esta simplificação faz o modelo mais simples de ser definido.

Figura 12 – Aproximação do avanço por aresta para uma reta



Fonte: Autor (2019)

De outra ótica, o presente estudo tem o objetivo de esclarecer as condições de formação do cavaco não deformado, as quais variam e se distribuem em uma grande quantidade de casos, o que torna extremamente difícil a obtenção de um único equacionamento para todos os casos existentes.

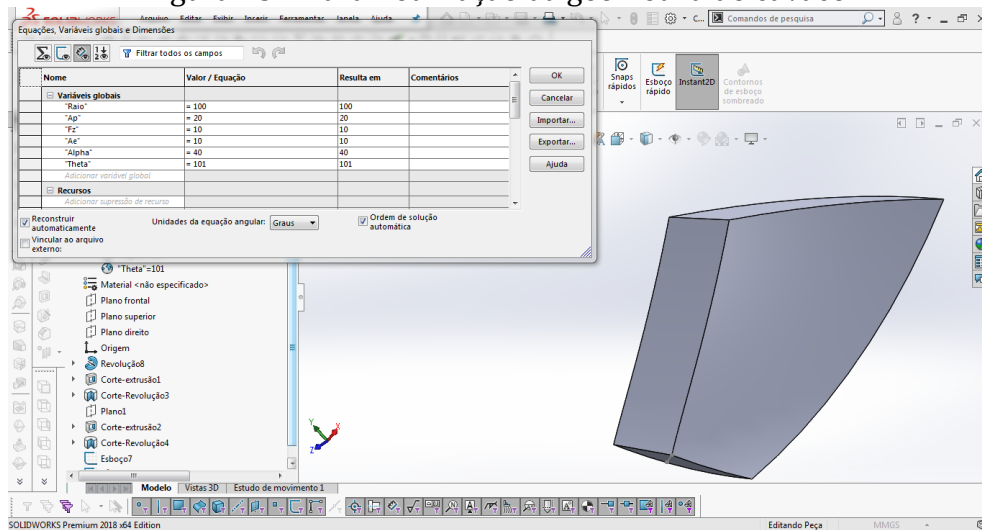
As limitações do equacionamento estão relacionadas aos parâmetros utilizados para a usinagem, é então definido que de acordo com a modelagem proposta, o cavaco deve estar contido entre as superfícies descritas anteriormente. Desconsidera-se também que o cavaco possa ser removido pelo corpo da ferramenta, o que pode ser ocasionado por um corte com alta inclinação (corte tangencial) e parâmetros de processo com alta magnitude. Estas condições estariam acima de valores usuais máximos para operações de acabamento.

Desta ótica o modelo se adequa a uma grande quantidade de casos, pois nas operações de acabamento, foco do trabalho, é usual utilizar parâmetros de pequena magnitude, removendo uma pequena quantidade de material.

3.2 VALIDAÇÃO DO MODELO

Visando validar o modelo, foi feito um estudo geométrico das seções utilizando um *software* CAD. O *software* escolhido foi o *Solid Works*, pois foi possível representar as superfícies por operações parametrizadas em função das entidades utilizadas como entrada no equacionamento.

Figura 13 – Parametrização da geometria do cavaco



Fonte: Autor (2019)

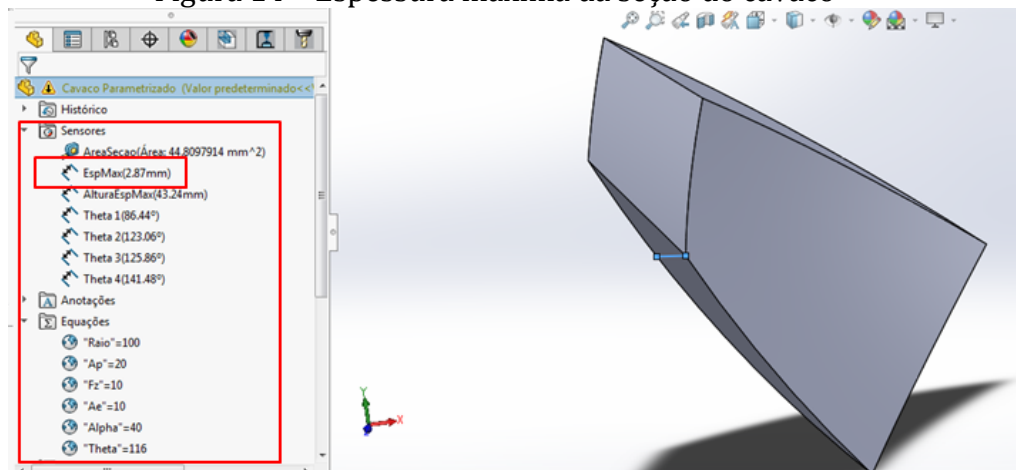
Para a geração do cavaco, as operações no *software* foram realizadas seguindo a sequência descrita a seguir. Primeiramente foi criada uma esfera sólida centrada na origem do esboço representando a possível região que contém o cavaco (esfera atual). Na sequência outra esfera é criada e deslocada a uma distância f_z , parametrizada utilizando as variáveis globais disponíveis no *software*. Esta distância deve respeitar a inclinação da superfície de trabalho, para tal é criado um ângulo α que represente a mesma. Desta forma independente do valor do acréscimo estipulado, a esfera estará localizada no sentido do avanço na direção negativa e representará a esfera anterior. A terceira operação realizada é a remoção do material que está acima do plano de trabalho. Este plano, descrito anteriormente, está localizado a uma distância $R_0 - a_p$ da origem na direção normal à superfície ou a_p se for medido na direção inversa, desde a borda da aresta. Definindo assim a variável global a_p , este plano deve estar orientado em função do ângulo α . Neste momento o sólido obtido é equivalente a um corte de canal, onde existe material em metade da rotação da ferramenta, sendo necessário ainda remover o que foi retirado pela passada anterior da ferramenta, representada no modelo pelo cilindro. Este é criado realizando uma operação de corte por extrusão, por uma circunferência de mesmo raio da ferramenta (R_0), que se localiza a uma distância a_e da origem, gerando por fim a terceira variável global da parametrização. Desta forma é possível representar a geometria do cavaco por operações booleanas, o que remete a uma geometria com dimensões reais, utilizando a modelagem aplicada. As variáveis globais podem ser visualizadas na Figura 13, as alterações são realizadas diretamente na janela de variáveis.

Realizando uma operação de corte por revolução (representando o corte da aresta de corte, podemos verificar a área formada e esta representa a área transversal da seção do cavaco, alvo do presente estudo). Este corte foi parametrizado com um ângulo θ em função da rotação que se quer avaliar.

Toda a parametrização teve o intuito de facilitar a avaliação das áreas e espessuras ao longo do cavaco para as várias condições exploradas. Para cada combinação de parâmetros de usinagem, foram avaliadas as áreas das seções em várias posições de θ com o intuito de verificar a precisão da modelagem e visualizar correções da mesma. Foram observadas 16 condições de corte variando f_z , a_p e a_e em dois níveis contemplando as condições usuais de acabamento, e a inclinação α em dois níveis. Estes testes visam confrontar os dados que são gerados pela modelagem matemática para o mesmo conjunto de parâmetros.

Para avaliar as espessuras de cada área da seção obtida, foi escolhido avaliar as espessuras máximas da seção, esta está localizada por uma linha que sai do eixo da ferramenta e passa pelo ponto que divide as equações que delimitam a área do corte, e pode ser visualizado na Figura 14. Esse método foi escolhido visando onerar menos o processo avaliativo e desta forma pode-se obter a avaliação cabível ao estudo.

Figura 14 – Espessura máxima da seção do cavaco



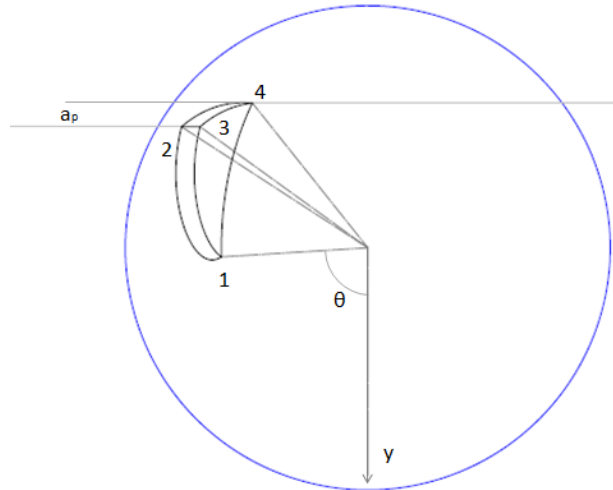
Fonte: Autor (2019)

Dado isto, resta apresentar o desenvolvimento matemático para obter as áreas e espessuras necessárias para o estudo. O desenvolvimento visa explicitar todos os passos para obter a formulação e a implementação do modelo para que possa ser utilizado em estudos futuros.

As variáveis de saída da análise são a área da seção transversal do cavaco, a espessura máxima de uma seção, a distância do eixo em que se encontra o ponto de máxima espessura, e as posições dos pontos triplos, medidas em θ e ρ . Os pontos triplos são as intersecções entre três superfícies, estes pontos são importantes, pois definem uma transição de regiões de formação da área da seção transversal. A posição de cada um dos pontos pode ser visualizada na Figura 15, onde mostra uma vista na direção axial da ferramenta. Para adquirir estes dados, foram posicionados sensores de medidas na modelagem do *solidworks* em cada uma das variáveis. Podemos observar na Figura 16 o funcionamento dos sensores na lateral esquerda, variando automaticamente com a alteração dos parâmetros

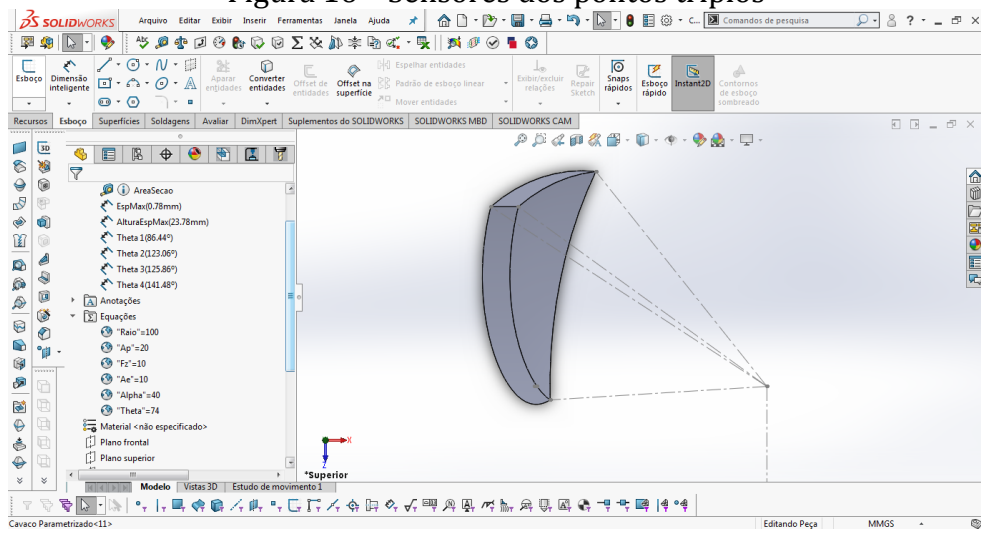
Assim, o seguinte desenvolvimento matemático utiliza como dados de entrada os mesmos parâmetros de entrada em um processo de usinagem. Foi tomado cuidado para que somente os parâmetros principais fossem utilizados nessa modelagem, facilitando o desenvolvimento do estudo.

Figura 15 – Posição dos pontos triplos



Fonte: Autor (2019)

Figura 16 – Sensores dos pontos triplos



Fonte: Autor (2019)

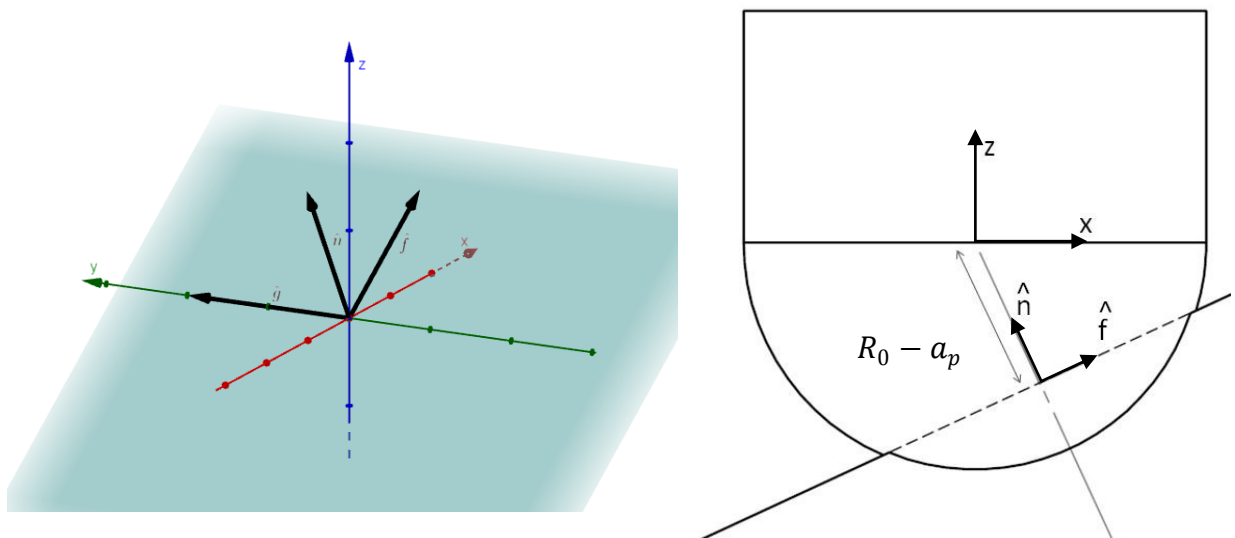
4 RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados os desenvolvimentos das equações das superfícies consideradas na modelagem proposta, iniciando com o desenvolvimento dos sistemas de coordenadas necessários, declarando as variáveis que serão utilizadas, detalhando as equações e os resultados da validação do método proposto

4.1 DEFINIÇÕES DO SISTEMA DE COORDENADAS

Primeiramente deve ser estabelecida uma série de variáveis necessárias para a modelagem, iniciando pela definição dos sistemas de coordenadas que serão utilizados. O primeiro sistema de referência usa as coordenadas da máquina que é denominado sistema de coordenadas máquina (SCM). O segundo sistema de coordenadas está na superfície da peça e está orientado em função da movimentação da ferramenta nesta superfície, é o sistema de coordenada da superfície (SCS). A posição dos sistemas de coordenadas é apresentada na Figura 17.

Figura 17 – Visualização dos sistemas de coordenadas SCM e SCS



Fonte: Autor (2019)

Definição de vetores e ângulos utilizados na modelagem para encontrar área de corte no fresamento utilizando fresas esféricas.

a) Vetores de base associados aos eixos inerciais do CNC

\hat{i} – direção do avanço projetada no plano horizontal do CNC

\hat{k} – direção axial da ferramenta (eixo arvore da máquina)

$\hat{j} = \hat{i} \times \hat{k}$ direção que completa o sistema ortonormal dextrogiro $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$.

b) Vetores do plano da peça: (retangulares)

\hat{n} – versor normal ao plano da peça, obtido através da resultante de três componentes projetados nos eixos $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$ do CNC.

$$1 = \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} \quad 7$$

$$\hat{n} = n_x \hat{i} + n_y \hat{j} + n_z \hat{k} \quad 8$$

\hat{f} – direção do avanço por aresta f_z que representa a direção efetiva de avanço da ferramenta no plano da peça.

$$\hat{f} = \frac{\hat{n} \times \hat{j}}{|\hat{n} \times \hat{j}|} = \frac{n_z \hat{i} - n_x \hat{k}}{\sqrt{n_x^2 + n_z^2}} = \frac{n_z \hat{i} - n_x \hat{k}}{\sqrt{1 - n_y^2}} \quad 9$$

\hat{g} – direção do passe lateral, que por ser definido pelo produto vetorial entre f e n , está no sentido contrário do passe lateral ae .

$$\hat{g} = \hat{n} \times \hat{f} \quad 10$$

$$\hat{g} = (n_x \hat{i} + n_y \hat{j} + n_z \hat{k}) \times \frac{n_z \hat{i} - n_x \hat{k}}{\sqrt{1 - n_y^2}} \quad 11$$

Assim, resolvendo a multiplicação vetorial, obtemos \hat{g} como:

$$\hat{g} = \frac{-n_y n_x}{\sqrt{1-n_y^2}} \hat{i} + \frac{n_x^2 + n_z^2}{\sqrt{1-n_y^2}} \hat{j} + \frac{-n_z n_y}{\sqrt{1-n_y^2}} \hat{k} \quad 12$$

c) parâmetros de posição: (esféricas)

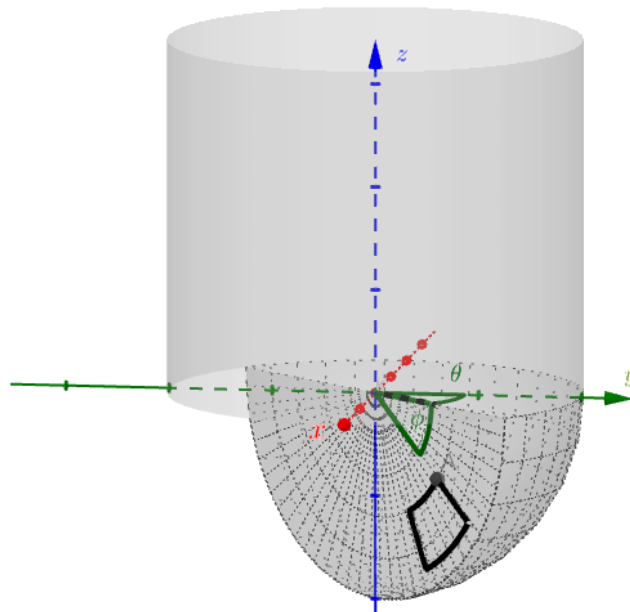
r – variável radial.

ϕ - ângulo polar da aresta medido com relação ao plano \hat{i}, \hat{j} .

θ – ângulo de rotação em torno do eixo \hat{k}

Dessa forma definindo os sistemas de coordenadas, objetiva-se encontrar as equações que definem a representação geométrica da intersecção entre a ferramenta e a peça, definida por uma rotação anterior, a rotação atual, a superfície da peça e o cilindro. O objetivo inicial é encontrar os elementos de área formados durante a rotação da ferramenta e pode ser observado na Figura 18 $dA = r \cdot dr \cdot d\phi$.

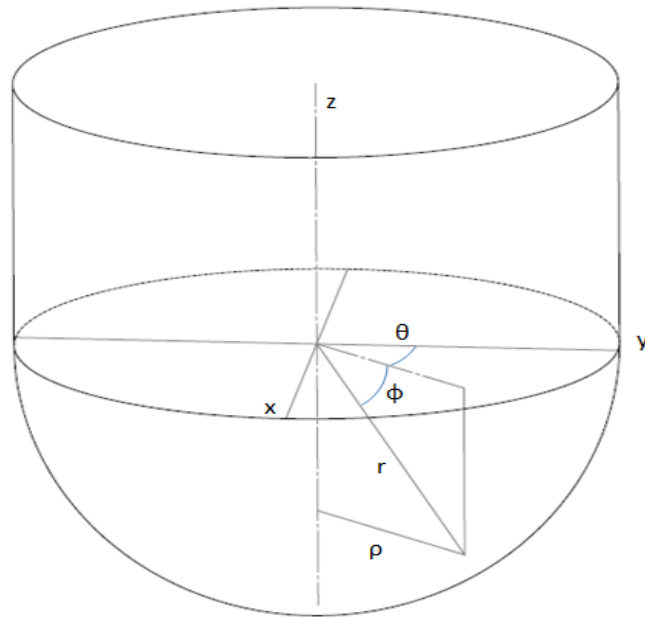
Figura 18 – Elemento de área em coordenadas esféricas



Fonte: Autor (2019)

As variáveis angulares servirão de auxílio para a modelagem, a variável r poderá assumir qualquer valor dentro do raio da esfera, e está demonstrada na Figura 19, com o valor do raio da ferramenta R_0 .

Figura 19 – Apresentação das variáveis angulares e radial



Fonte: Autor (2019)

4.2 DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO DAS SUPERFÍCIES DO CAVACO

4.2.1 Esfera atual

A esfera atual é o volume resultante da rotação da ferramenta que, efetivamente, produz o cavaco. O material a formar o cavaco deve estar contido dentro do volume definido por essa superfície. A superfície esférica que delimita tal volume está centrada na origem do sistema SCM:

$$\begin{cases} x = R_0 \cos \phi \cos \theta \\ y = R_0 \cos \phi \sin \theta \\ z = -R_0 \sin \phi \end{cases} \quad 13$$

Em que R_0 é o raio da ferramenta, ϕ é o ângulo polar medido a partir do plano $z = 0$ e θ é o ângulo de rotação da aresta. O domínio das variáveis angulares é:

$$\begin{cases} 0 \leq \phi \leq \pi/2 \\ 0 \leq \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad 14$$

Note que, o domínio estabelecido nas equações 14 define um hemisfério no lado negativo do eixo z. E para $\theta = 0$ nas equações, a aresta está posicionada sobre o eixo de y.

4.2.2 Esfera da rotação anterior

A esfera anterior é o volume resultante da última rotação da ferramenta, e delimita uma das superfícies do cavaco. O material a formar o cavaco deve estar fora do volume delimitado pela esfera anterior. Trata-se de uma superfície esférica cujo centro está deslocado de uma distância f_z na direção oposta à direção do avanço, i.e. $-\hat{f}$. Na equação 15 está definido o vetor unitário \hat{f} , onde se observa que não há componente em \hat{j} . Portanto, o deslocamento do centro da esfera anterior é:

$$\begin{aligned} -f_z \hat{f} &= \Delta x \hat{i} + \Delta z \hat{k} \\ &= -f_z \frac{n_z}{\sqrt{1-n_y^2}} \hat{i} + f_z \frac{n_x}{\sqrt{1-n_y^2}} \hat{k} \end{aligned} \quad 15$$

E a equação da superfície da esfera anterior é:

$$\begin{cases} x = \Delta x + R_0 \cos \alpha \cos \beta \\ y = R_0 \cos \alpha \sin \beta \\ z = \Delta z - R_0 \sin \alpha \end{cases} \quad 16$$

Em que α e β são os ângulos polar e azimutal, respectivamente. No entanto, é necessário descrever a superfície em função dos mesmos ângulos ϕ e θ da equação 13. Para tanto faz-se necessário resolver o seguinte sistema de equações:

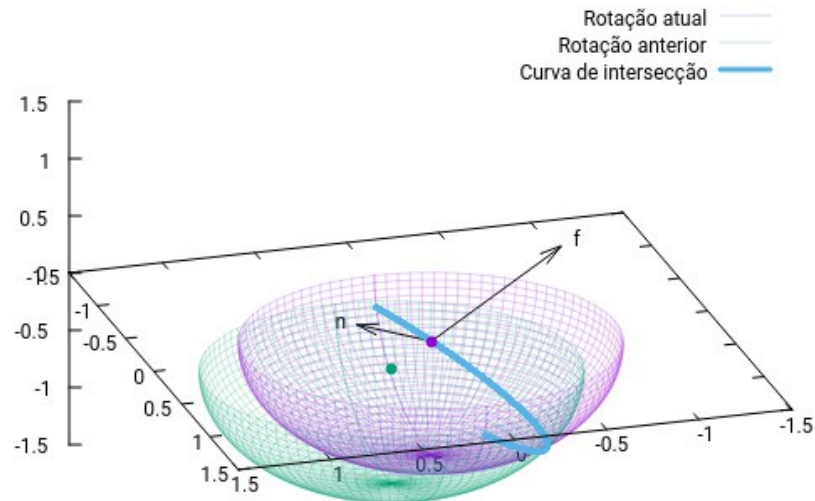
$$\begin{cases} x = r \cos \phi \cos \theta = R_0 \cos \alpha \cos \beta + \Delta x \\ y = r \cos \phi \sin \theta = R_0 \cos \alpha \sin \beta \\ z = r \sin \phi = -R_0 \sin \alpha + \Delta z \end{cases} \quad 17$$

Em que $r_0 = r_0(\phi, \theta)$ é uma função que descreve a variação do raio da esfera anterior devido ao deslocamento de seu centro. Resolvendo o sistema de equações para r_0 , obtemos:

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{(\Delta x \cos \phi \cos \theta + \Delta z \sin \phi)^2 - (f_z^2 - R_0^2)} \\ &\quad + (\Delta x \cos \phi \cos \theta + \Delta z \sin \phi) \end{aligned} \quad 18$$

As equações foram plotadas na Figura 20, com o auxílio do *software* Gnuplot, e evidencia que a formulação matemática pode representar as superfícies desejadas.

Figura 20 – Plotagem das equações

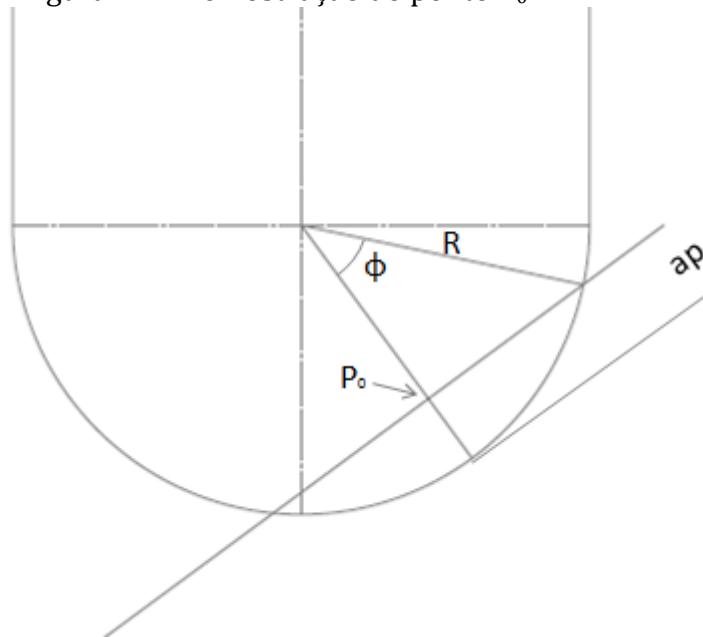


Fonte: Autor (2019)

4.2.3 Definição da equação do plano

A equação do plano deve ser definida para representar a superfície da peça à ser usinada, esta está orientada conforme o vetor normal e está distante da origem uma magnitude de R_0 -ap.

A equação do plano em geometrias vetorial pode ser descrita pela diferença entre dois vetores que possuem seus extremos contidos no plano, multiplicados pelo vetor normal, o resultado desta multiplicação deve ser igual a zero para que os pontos estejam contidos no plano.

Figura 21 – Demonstração do ponto P_0 

Fonte: Autor (2019)

Como pode ser visto na Figura 21 o vetor P_0 é o vetor que liga a origem ao ponto que está contido no plano e está na direção normal, passando pela origem dos sistemas de coordenadas.

$$\vec{P}_0 = -(R_0 - a_p) \cdot \hat{n} \quad 19$$

Pela definição de plano descrito anteriormente, pode-se escrever a expressão:

$$(\vec{r} - \vec{P}_0) \cdot \hat{n} = 0 \quad 20$$

Expandindo os termos do vetor r e \hat{n} em x , y e z :

$$\begin{cases} x = r \cos \phi \cos \theta \\ y = r \cos \phi \sin \theta \\ z = r \sin \phi \\ xn_x + yn_y + zn_z = a_p - R_0 \end{cases} \quad 21$$

Desenvolvendo o sistema da equação 21, e utilizando a transformação para coordenadas esféricas podemos obter a expressão. Isolando r obteve-se a equação do plano por:

$$r = \frac{(a_p - R_0)}{\cos \phi (\sin \theta n_x + \cos \theta n_y) - \sin \phi n_z} \quad 22$$

4.2.4 Definição da equação do cilindro

Para finalizar a modelagem matemática das superfícies, resta definir a equação que representa a atuação da ferramenta do passe lateral anterior. Esta representação é feita por um cilindro que tem o centro deslocado a_e na direção negativa de \hat{g} . A modelagem da superfície deve representar um cilindro em coordenadas esféricas, o procedimento matemático está descrito na sequência.

Primeiramente é necessário obter uma expressão para o cilindro deslocado em coordenadas cilíndricas, esta expressão contém a equação da circunferência em coordenadas polares e deve estar deslocada a_e na direção positiva de \hat{g} e não possui argumentos em \hat{f} , pois isto significa que está presente em todo o domínio de \hat{f} .

$$a_e \hat{g} + R_0(\cos \alpha \hat{g} - \sin \alpha \hat{n}) \quad 23$$

$$\begin{cases} r \cos \phi \sin \theta + a_e g_x = -R_0(g_x \cos \alpha + \sin \alpha n_x) \\ r \cos \phi \cos \theta + a_e g_y = -R_0(g_y \cos \alpha + \sin \alpha n_y) \\ r \sin \phi + a_e g_z = -R_0(g_z \cos \alpha + \sin \alpha n_z) \end{cases} \quad 24$$

Pode-se obter a equação que descreve o cilindro, solucionando o sistema para r.

$$r = \sqrt{G^2 + (a_e^2 + R_0^2)} - G \quad 25$$

Em que G é:

$$G = a_e(g_x \cos \phi \sin \theta + g_y \cos \phi \cos \theta + g_z \sin \phi) \quad 26$$

Uma vez definida as equações da esfera anterior, do plano e do cilindro anterior, em coordenadas esféricas, estas devem ser integradas na direção do raio e de ϕ , obtendo uma

seção transversal em função de θ . Com isto definido pode-se avaliar o comportamento da força de corte ao longo do corte, aplicando os coeficientes de KIENZLE para uma área específica determinada para avaliação.

Por limitações matemáticas, foi escolhido utilizar um modelo semi-analítico no qual se baseia na implementação das equações em um código computacional, que entregará a área com alta precisão.

4.3 DETALHAMENTO DA IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA

Para programar foi escolhida a linguagem “C”. O programa foi estruturado para receber novas funções de estudos futuros, as funções do raio de cada superfície foram implementadas e retornam o valor do raio para cada ϕ , θ , f_z , a_e , a_p , inclinação do plano de trabalho e os diferenciais na direção z e θ .

Foi definido um pacote de ferramentas, que encontram intersecções entre uma função e outra.

A primeira, “contato_cil” retorna o primeiro contato da aresta da ferramenta com o material que será removido. Esta indica onde o corte começa a ser realizado e, portanto, o início da região a ser estudada. O ponto foi definido utilizando a condição de raio menor que um para avaliar a transição, varrendo todos os valores de ϕ para cada θ , o programa para quando encontra o primeiro valor menor que 1, isto significa que existe material a ser removido.

Para elaboração do modelo, como visto anteriormente, foram utilizadas coordenadas cilíndricas para representar da melhor forma um elemento de área, este elemento é formado pelo produto da espessura encontrada para uma posição e a altura do elemento representado por dz , comprimento diferencial na direção z . Este comprimento se integrado, pode ser relacionado com o largura de corte “b” utilizado por Kienzle.

O código implementado varre todo o domínio do cavaco verificando as intersecções com as superfícies para uma dada posição em z e θ . A distância entre a origem e qualquer superfície é avaliada e somente é computada como espessura se estiver na região que contém material, o que em termos da modelagem significa que só é computado se estiver dentro da esfera atual, fora da esfera anterior, fora do cilindro e abaixo do plano. Desta forma o software fica robusto, pois não é possível computar áreas que não estão dentro do cavaco.

Uma vez que o sistema está robusto, a precisão da resposta está relacionada como refinamento da malha utilizada, dependendo apenas do poder computacional empregado. Desta forma, o sistema foi criado para receber o refinamento que o usuário quiser.

As limitações da modelagem e do *software* estão relacionadas com o contato do corpo da ferramenta na peça de trabalho, se esta situação ocorrer, o modelo não irá considerar o contato do corpo, limitando o cavaco somente pelas superfícies descritas. Para esses casos deveria ser modelado mais uma superfície representando o corpo da ferramenta, mas esse caso não foi contemplado pelo estudo.

4.4 VALIDAÇÃO DO MODELO

Uma vez que a modelagem das superfícies foi finalizada, é necessário verificar as medidas obtidas pelo software e compará-las com as medidas reais. Para o presente estudo esta validação será realizada utilizando um software CAD, mantendo a mesma teoria utilizada na modelagem. Os sólidos gerados representam o cavaco teórico limitado pelas superfícies anteriormente descritas, este sólido é então definido em função dos parâmetros usuais de usinagem, os ângulos de inclinação da superfície.

Uma vez que o sólido é gerado, é possível verificar que o volume e forma do cavaco, não se alteram com a inclinação do plano da superfície da peça, portanto podemos afirmar que o volume de material removido teórico é constante para certa combinação de variáveis, esta situação pode ser verificada pela avaliação do cavaco utilizando uma modelagem booleana com auxílio de um *software* CAD. Contudo o comportamento da área da seção transversal ao corte se altera para toda variação da inclinação. É possível ainda se compactar o volume do cavaco, obtendo um volume equivalente se deslocar todos elementos de volume na direção do avanço. Assim formando um volume com geometria regular, isto significa que o volume é independente da inclinação da ferramenta (LIANG, 2011).

A validação é dada em três partes, primeira é necessário verificar se os ângulos de posição (θ e ϕ) de cada ponto triplo foram definidos corretamente pelo software, esta validação irá definir que a transição de casos dentro do corte está correta. Em segundo lugar é necessário verificar se a espessura obtida pelo software está correta, esta foi verificada através de uma matriz experimental de 16 casos (variando os parâmetros de usinagem e a inclinação), avaliando as espessuras em posições θ de rotação da ferramenta. Finalmente são verificadas as espessuras obtidas ao longo da seção transversal de um corte, que pode ser avaliado pela área

obtida no CAD versus Software. Os casos são apresentados na Tabela 1 e explicitam as variações de parâmetros, cada parâmetro foi variado em dois níveis explorando uma parcela dos possíveis casos. Os parâmetros escolhidos foram selecionados com o intuito de explorar condições máximas e mínimas. Portanto as condições normais de aplicação estão em grande parte contidas no experimento.

Tabela 1 Apresentação dos casos avaliados

Caso	fz	ae	ap	α
1	0.10	0.40	0.20	15
2	0.02	0.40	0.20	15
3	0.10	0.10	0.20	15
4	0.02	0.10	0.20	15
5	0.10	0.40	0.40	15
6	0.02	0.40	0.40	15
7	0.10	0.10	0.40	15
8	0.02	0.10	0.40	15
9	0.10	0.40	0.20	40
10	0.02	0.40	0.20	40
11	0.10	0.10	0.20	40
12	0.02	0.10	0.20	40
13	0.10	0.40	0.40	40
14	0.02	0.40	0.40	40
15	0.10	0.10	0.40	40
16	0.02	0.10	0.40	40

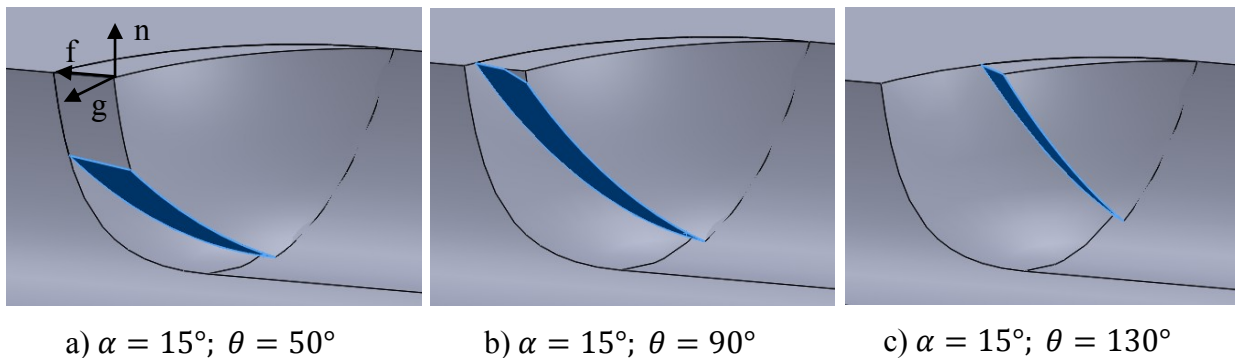
4.4.1 Casos de corte

Foi possível verificar que durante o corte em uma condição específica respeitando as limitações do software, surgem três casos de geometria da seção transversal ao corte. Seguindo o sentido de giro da ferramenta, no início do corte podemos ver que a área da seção, está limitada pela esfera atual, a esfera anterior e o cilindro, demonstrado na Figura 22 a), e foi denominada regime 1.

Em seguida passa por uma transição quando a rotação passa do ponto triplo (esfera atual, plano e cilindro), onde a área formada está contida entre quatro superfícies, esfera anterior, cilindro, plano e esfera atual. Esta região ocorre um uma pequena porção do corte, pois está compreendida entre uma variação pequena de θ , este é o regime2 Figura 22 b).

Por último o corte entra na região delimitada pela esfera anterior, o plano e a esfera atual (regime 3, Figura 22 c), onde finaliza o corte para as condições exploradas no estudo.

Figura 22 – Regimes de corte



Fonte: Autor (2019)

A definição de cada regime é essencial, pois para cada um, a área da seção deve ser calculada utilizando as equações condizentes. A espessura de cada elemento de área a ser integrado, é concebida pela diferença de uma reta, saindo do eixo da ferramenta e caminhando na direção radial paralela ao plano da máquina até cruzar as superfícies definidas.

4.4.2 Validação das espessuras e áreas

Foram realizados testes para comparação dos resultados obtidos pelo software e comparados com os obtidos na simulação do cavaco no CAD. Estes contemplaram dezesseis condições variando os parâmetros usuais de usinagem bem como a inclinação, e avaliadas as espessuras máximas em várias posições da rotação θ .

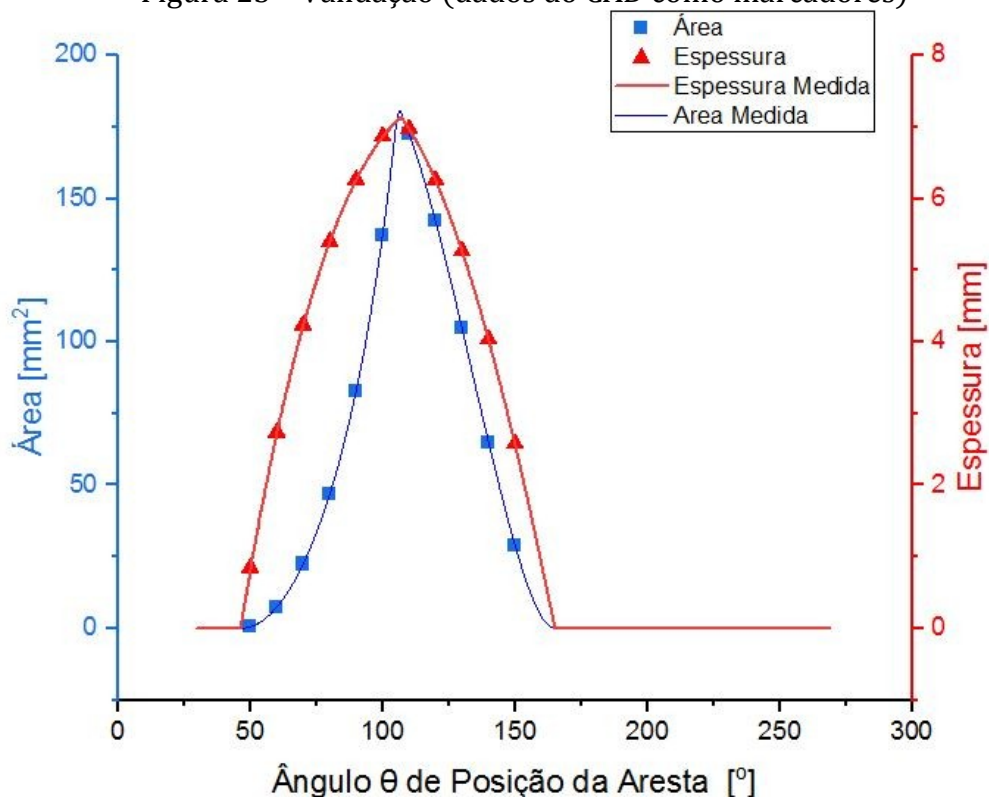
O objetivo é verificar se os dados obtidos pela modelagem proposta ficaram condizentes com os dados obtidos no *Software* CAD. Para tal foram realizadas uma série de avaliações das medidas geradas pela geometria do cavaco, descrito na metodologia.

Foram avaliados dezesseis casos variando os parâmetros de entrada em dois níveis cada, e assim avaliados os valores obtidos para cada posição da rotação da ferramenta, este ângulo foi variado de forma incremental a cada vinte graus.

As medidas avaliadas foram a área e a espessura máxima do cavaco, na Tabela 2 do Apêndice A, são apresentados todos os parâmetros utilizados em cada caso, bem como os resultados obtidos para cada caso, os erros relativos da comparação são apresentados ao lado dos números de elementos que formam cada área da seção transversal do cavaco.

Na Figura 23 é possível observar que os dados obtidos pela modelagem proposta coincidem com os valores obtidos no software CAD, apresentando valores de erro abaixo de 1%. Os erros ocorrem recorrentemente no início e no final do corte, região com dimensões de áreas pequenas o que leva a uma redução do número de elementos de área que formam a aproximação numérica. Pode-se considerar que os erros ficaram abaixo de 1%, considerando que durante todo o domínio angular do corte, os erros aparecem em uma pequena região, desta forma assumindo que na porção mais central, permanece com erros limitados.

Figura 23 – Validação (dados do CAD como marcadores)

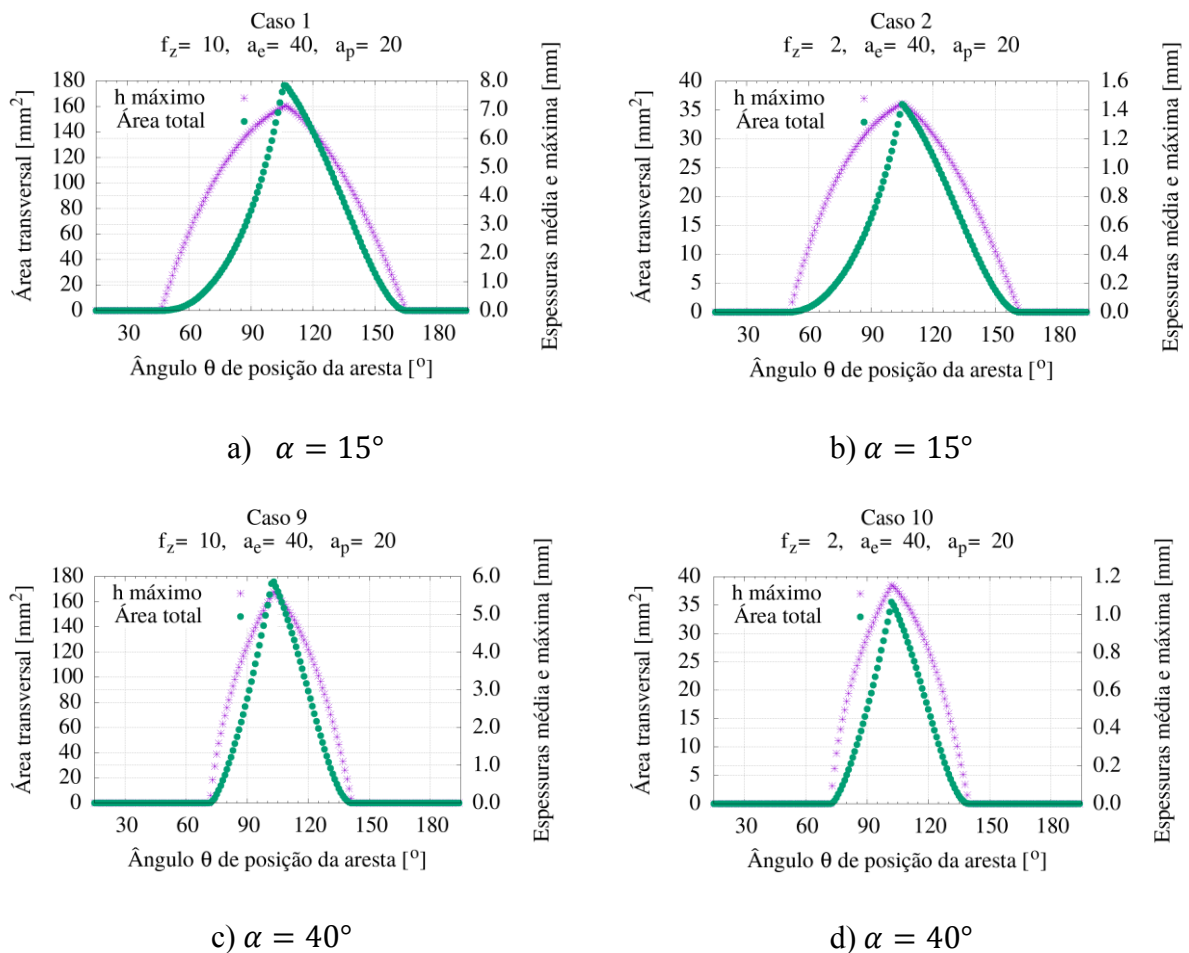


Fonte: Autor (2019)

4.5 COMPORTAMENTO DA ÁREA E DA ESPESSURA EM FUNÇÃO DOS PARAMETROS

Alterando o avanço por aresta de 10% do raio da ferramenta, para 2% é possível notar que não há mudanças na progressão das curvas, mas sim com relação às magnitudes. É possível visualizar na Figura 24 que o corte ocorre em uma região menor da rotação da ferramenta, quando se diminui o avanço por aresta. Além disso é possível visualizar que os valores de áreas e espessuras diminuem com a diminuição do avanço.

Figura 24 - Variação do avanço

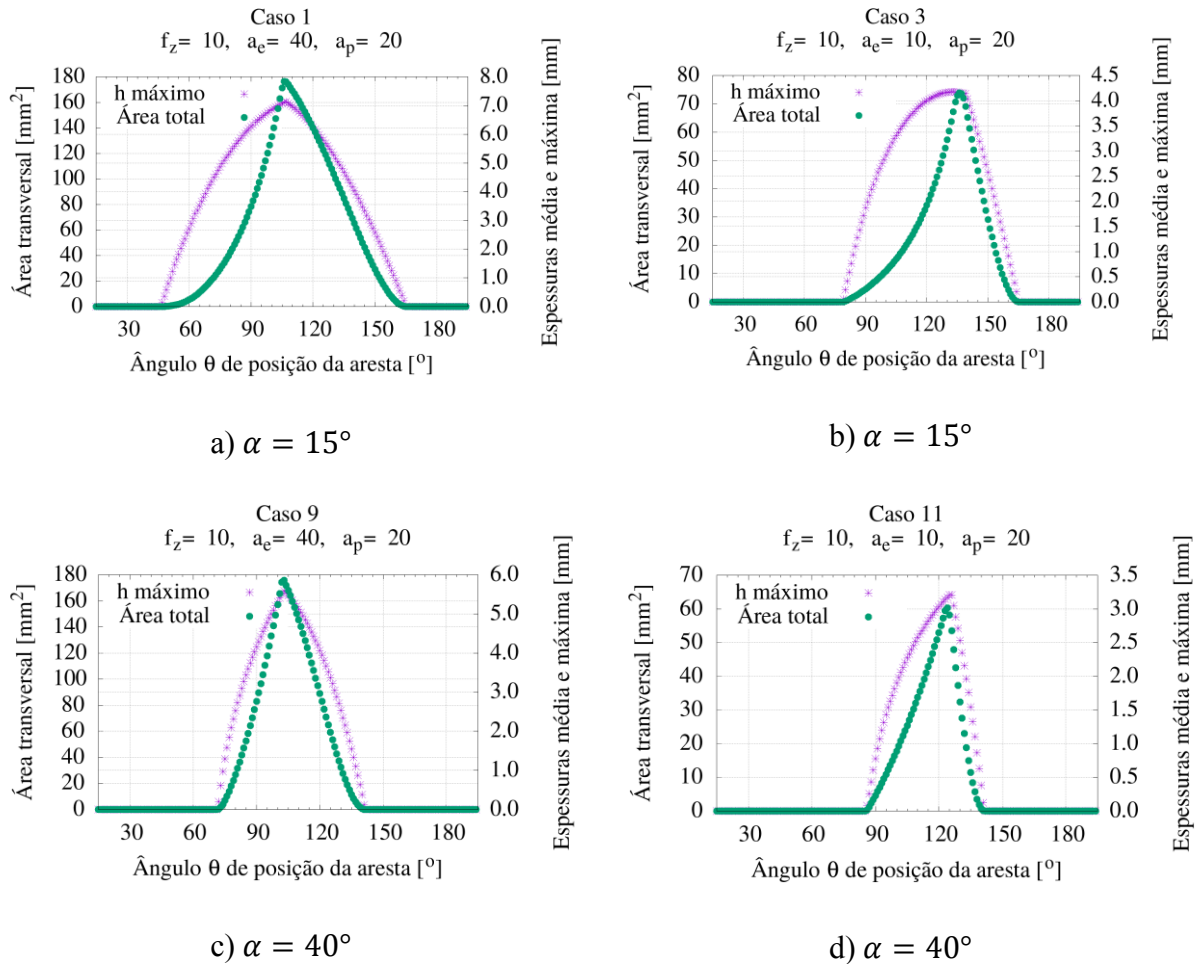


Fonte: Autor (2019)

Quando comparamos a mudança da penetração de trabalho, é possível verificar que há mudança no comportamento da progressão da área, o domínio do cavaco no corte diminui e o ponto de área máxima se desloca para a porção final da região de corte. Ainda é possível notar que os pontos máximos estão alinhados levando a entender que a região de maior área

de corte também é a região de maior espessura. O comportamento da área e da espessura em função do ângulo de posição da aresta com a alteração da penetração de trabalho e a inclinação podem ser visualizados na Figura 25.

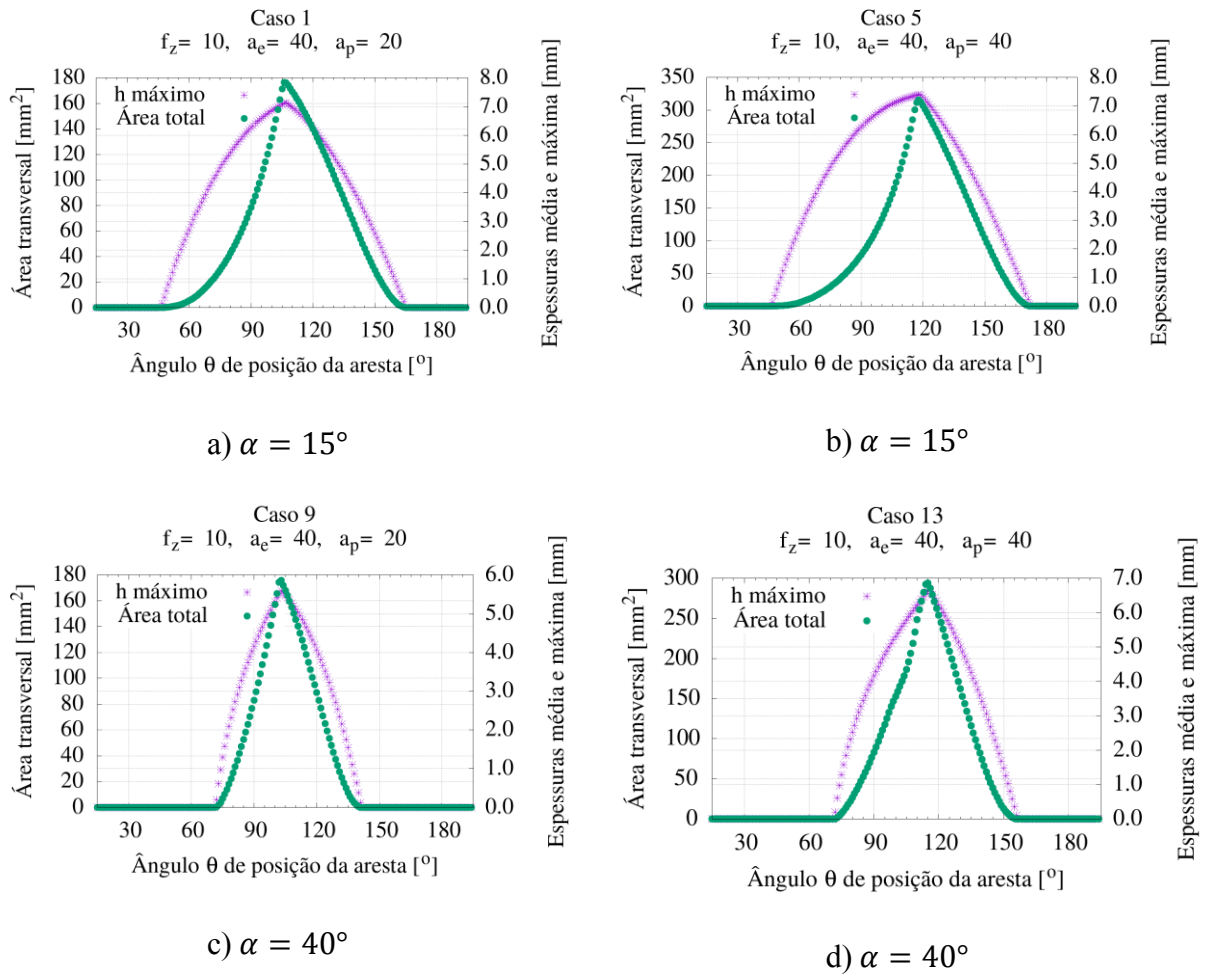
Figura 25 - Variação da penetração de trabalho



Fonte: Autor (2019)

Avaliando a contribuição da profundidade de usinagem é possível verificar que o domínio do corte se mantém e os pontos máximos são deslocados para a porção final do corte. A magnitude das áreas e espessuras aumenta com o acréscimo da profundidade de usinagem. Este comportamento pode ser visualizado na Figura 26.

Figura 26 - Variação da profundidade de usinagem



Fonte: Autor (2019)

5 CONCLUSÃO

Perante o estudo realizado foi possível apresentar toda a discussão sobre o problema avaliado, iniciando com contextualização, onde são abordados os processos de fabricação de formas complexas e as definições dos mesmos. Sabendo da importância de se esclarecer o comportamento da formação do cavaco por processos de fresamento com ferramentas de ponta esférica, o estudo se posiciona como ferramenta para avaliar as áreas e espessuras ao longo de um corte.

O estudo apresenta a metodologia utilizada para desenvolver tal ferramenta, que consistiu em assumir que o volume do material a ser removido está contido entre as superfícies descritas anteriormente. Desta forma foi possível descrever cada uma matematicamente, para que posteriormente fossem implementadas utilizando uma ferramenta numérica, desenvolvida para retornar os valores de interesse.

Foi possível verificar que para encontrar um equacionamento analítico para o problema abordado, é necessário descrever matematicamente a posição de cada ponto triplo presente na geometria, pois estes seriam os limites de interação de cada região de formação do cavaco. A ferramenta desenvolvida visa facilitar o entendimento do comportamento de variação da posição destes pontos conforme os parâmetros de usinagem se alteram. Uma vez que forem definidos, a formulação analítica pode ser realizada.

Diante da ferramenta desenvolvida foi verificada a precisão do modelo em relação utilizando um *software* CAD, que consegue prover as mesmas variáveis de saída utilizando outra metodologia, assim sendo possível avaliar a consistência da implementação. Foi possível verificar que a ferramenta se ajusta a grande parte dos casos de usinagem de acabamento, obtendo erros abaixo de 1%, desta forma tornando largamente aplicável.

Durante a avaliação foi possível associar o erro à quantidade de elementos de área que compõem a seção, desta forma para seções com dimensões pequenas apresentam maior erro. Esta questão pode ser minimizada com o refinamento dos parâmetros da simulação, o que gera um maior tempo de processamento.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 3002-1:2013: Grandezas básicas em usinagem e retificação Parte 1: Geometria da parte cortante das ferramentas de corte - Termos gerais, sistemas de referência, ângulos da ferramenta e de trabalho e quebra-cavacos**. Rio de Janeiro, p. 33. 2015. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6175:2015: Usinagem - processos mecânicos**. Rio de Janeiro, p. 33. 2015. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.
- CHEN, T.; SHI, Z. A tool path generation strategy for three-axis ball-end milling of free-form surfaces. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 208, p. 259-263, Novembro 2008.
- DIB, M. H. M.; BENJAMIN, G. M.; JASINEVICIUS, R. G. Uma análise experimental do fresamento discordante e concordante. **Revista Iluminart**, v. 7, p. 113-128, 2015.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: MM Editora, 2002.
- FALLBÖHMER, P. et al. Survey of the die and mold manufacturing industry - practices in Germany, Japan, and the United States. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 59, p. 158-168, Maio 1996.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgar Blücher Ltda., 1970.
- FU, Z. et al. An analytical force model for ball-end milling based on a predictive machining theory considering cutter runout. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 84, p. 2449–2460, Junho 2016.
- GONZALO, O. et al. Prediction of specific force coefficients from a FEM cutting model. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 43, p. 348-356, Setembro 2008.
- JIAN-WEI, M. et al. Effect of geometric feature and cutting direction on variation of force and vibration in high-speed milling of TC4 curved surface. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Dalian, v. 95, p. 2207 - 2218, Novembro 2017.
- KARPUSCHEWSKI, B.; BINH, N. T.; BEŇO, J. An Emperical Cutting-Force Model in High-Speed-Milling Process with Spherical Cutter, p. 5 - 8, 2007.

- KAYAL, P. Inverse offset method for adaptive cutter path generation. **International Journal of CAD/CAM**, v. 7, 2007.
- KECELJ, B. et al. Speciality of HSC in manufacturing of forging dies. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 157–158, p. 536-542, Dezembro 2004.
- KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1: Cutting**. [S.l.]: Springer, v. 1, 2011.
- KO, T. J. Selection of the Machining Inclination Angle in High-Speed Ball End Milling`. **Advanced Manufacturing Technollogy**, London, p. 163-170, jan. 2001.
- LAMIKIZ, A. et al. Cutting force estimation in sculptured surface milling. **Machine Tools and Manufacture**, v. 44, p. 1511-1526, Maio 2004.
- LIANG, X.-G. An accuracy algorithm for chip thickness modeling in 5-axis ball-end finish milling. **Computer-Aided Design**, Shanghai, v. 43, p. 971-978, abr. 2011.
- LOTFI, S. et al. An approach to modeling the chip thickness and cutter workpiece engagement region in 3 and 5 axis ball end milling. **Journal of Manufacturing Processes**, Toulouse, v. 34, p. 7-17, maio 2018.
- RUBEO, M. A.; SCHMITZ, T. L. Milling force modelling: a comparison of two approaches. **Procedia Manufacturing**, v. 5, p. 90-105, 2016.
- SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. 1^a. ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2007.
- SHAMINA, O. B.; BELOUS, L. A.; OGOL, I. I. Research on the optimal cutting parameters for ball end finish milling process of complex surfaces. **International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems**, Tomsk, 2014.
- SOUZA, A. F. D. et al. Investigating the cutting phenomena in free-form milling using a ball-end cutting tool for die and mold manufacturing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 71, p. 1565-1577, 2014.
- SOUZA, A. F. D. et al. Influences of the tool path strategy on the machining force when milling free form geometries with a ball-end cutting tool. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 37, p. 675–687, 2015.
- SOUZA, A. F. D.; ULBRICH, C. B. L. **Engenharia Integrada por Computador e Sistemas CAD/CAM/CNC: Princípios e Aplicações**. 2^a. ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2013.
- TERAI, H. et al. Geometric Analysis of Undeformed Chip Thickness in Ball-Nose End Milling. **JSME**, v. 47, n. 1, p. 02-07, jan. 2004.
- WEINERT, K.; SURMANN, T. Geometric Simulation of the Milling. **Simulation Aided Offline Process Design and Optimization in Manufacturing Sculptured Surfaces**, v. 27, n. 28, p. 21-30, 2003.

WOJCIECHOWSKI, S. The estimation of cutting forces and specific force coefficients during finish ball end milling of inclined surfaces. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 89, p. 110-123, 2015.

XIAO XIAO, C. et al. Investigation on ball end milling of P20 die steel with cutter orientation. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 59, p. 885-898, Agosto 2011.

APÊNDICE A

Tabela 2 - Comparação dos dados obtidos com o CAD

Caso	fz	ap	α	θ	Área CAD	Espessura CAD	Área Medida	Espessura Medida	Erro Espessura	Erro Área	Número de elementos
1	10	20	15	50	0,56	0,85	0,34	0,80	5,85%	39,57%	5
1	10	20	15	70	22,59	4,24	19,11	4,23	0,17%	15,40%	60
1	10	20	15	90	83,07	6,27	78,41	6,26	0,09%	5,61%	167
1	10	20	15	110	172,74	6,98	169,26	6,97	0,10%	2,01%	315
1	10	20	15	130	104,75	5,27	103,96	5,27	0,01%	0,75%	271
1	10	20	15	150	29,12	2,58	29,12	2,57	0,20%	0,00%	183
2	2	20	15	70	3,87	0,82	3,60	0,82	0,22%	7,02%	60
2	2	20	15	90	16,69	1,28	16,23	1,28	0,22%	2,80%	167
2	2	20	15	110	33,92	1,39	33,64	1,39	-0,16%	0,80%	315
2	2	20	15	130	18,98	1,01	18,98	1,01	-0,36%	0,00%	271
2	2	20	15	150	3,83	0,42	3,83	0,42	-0,73%	0,06%	152
3	10	20	15	90	4,60	1,87	4,60	1,87	-0,07%	-0,02%	42
3	10	20	15	110	20,20	3,62	20,20	3,61	0,35%	0,00%	96
3	10	20	15	130	57,30	4,17	57,30	4,17	0,11%	0,00%	229
3	10	20	15	150	29,12	2,58	29,12	2,57	0,20%	0,00%	183
4	2	20	15	90	1,00	0,53	1,00	0,53	0,82%	0,03%	33
4	2	20	15	110	4,49	0,84	4,49	0,84	0,12%	0,00%	86
4	2	20	15	130	12,65	0,9	12,65	0,90	-0,42%	0,00%	214
4	2	20	15	150	3,83	0,42	3,83	0,42	-0,73%	0,06%	152
5	10	40	15	50	0,56	0,85	0,34	0,80	5,85%	39,57%	5
5	10	40	15	70	22,59	4,24	19,11	4,23	0,17%	15,40%	60
5	10	40	15	90	83,07	6,27	78,41	6,26	0,09%	5,61%	167
5	10	40	15	110	223,83	7,23	220,35	7,23	0,04%	1,55%	409
5	10	40	15	130	246,32	6,35	245,54	6,35	0,00%	0,32%	512
5	10	40	15	150	104,07	3,74	104,08	3,74	0,00%	-0,01%	415
5	10	40	15	170	1,98	0,43	1,98	0,42	1,49%	0,05%	89
6	2	40	15	70	3,87	0,82	3,60	0,82	0,22%	7,02%	60
6	2	40	15	90	16,69	1,28	16,23	1,28	0,22%	2,80%	167
6	2	40	15	110	46,79	1,48	46,52	1,48	0,28%	0,58%	409
6	2	40	15	130	46,36	1,24	46,36	1,24	0,27%	0,00%	512
6	2	40	15	150	17,01	0,68	17,01	0,68	0,04%	0,00%	384
7	10	40	15	90	4,60	1,87	4,60	1,87	-0,07%	-0,02%	42
7	10	40	15	110	20,20	3,62	20,20	3,61	0,35%	0,00%	96
7	10	40	15	130	57,30	4,17	57,30	4,17	0,11%	0,00%	229
7	10	40	15	150	104,07	3,74	104,08	3,74	0,00%	-0,01%	415
7	10	40	15	170	1,98	0,43	1,98	0,42	1,49%	0,05%	89
8	2	40	15	90	1,00	0,54	1,00	0,53	2,66%	0,03%	33

8	2	40	15	110	4,49	0,84	4,49	0,84	0,12%	0,00%	86
Caso	fz	ap	α	θ	Área CAD	Espessura CAD	Área Medida	Espessura Medida	Erro Espessura	Erro Área	Número de elementos
8	2	40	15	130	12,65	0,9	12,65	0,90	-0,42%	0,00%	214
8	2	40	15	150	17,01	0,68	17,01	0,68	0,04%	0,00%	384
9	10	20	40	90	83,07	4,17	83,07	4,16	0,22%	0,00%	353
9	10	20	40	110	145,32	5,12	145,32	5,12	0,09%	0,00%	490
9	10	20	40	130	32,31	2,54	32,31	2,53	0,31%	0,00%	235
10	2	20	40	90	16,69	0,88	16,69	0,88	-0,16%	0,00%	328
10	2	20	40	110	28,44	1,05	28,44	1,04	0,49%	0,00%	463
10	2	20	40	130	5,24	0,48	5,24	0,48	0,72%	0,00%	202
11	10	20	40	90	4,60	0,78	4,60	0,78	0,42%	0,00%	100
11	10	20	40	110	33,73	2,58	33,73	2,57	0,21%	0,00%	241
11	10	20	40	130	32,31	2,54	32,31	2,53	0,31%	0,00%	235
12	2	20	40	90	1,00	0,26	1,00	0,26	1,70%	0,01%	75
12	2	20	40	110	7,07	0,6	7,07	0,60	0,36%	0,00%	214
12	2	20	40	130	5,24	0,48	5,24	0,48	0,72%	0,00%	202
13	10	40	40	90	83,07	4,17	83,07	4,16	0,22%	0,00%	353
13	10	40	40	110	250,51	6,22	248,64	6,22	0,03%	0,75%	664
13	10	40	40	130	162,12	5,01	162,12	5,00	0,15%	0,00%	568
13	10	40	40	150	13,04	1,47	13,05	1,47	-0,06%	-0,02%	170
14	2	40	40	90	16,69	0,88	16,69	0,88	-0,16%	0,00%	328
14	2	40	40	110	51,43	1,31	49,62	1,30	0,81%	3,52%	637
14	2	40	40	130	30,18	0,99	30,18	0,99	0,46%	0,00%	535
14	2	40	40	150	1,46	0,23	1,46	0,23	2,09%	0,00%	125
15	10	40	40	90	4,60	0,78	4,60	0,78	0,42%	0,00%	100
15	10	40	40	110	33,73	2,58	33,73	2,57	0,21%	0,00%	241
15	10	40	40	130	76,00	3,36	76,00	3,36	0,11%	0,00%	412
15	10	40	40	150	13,04	1,47	13,05	1,47	-0,06%	-0,02%	170
16	2	40	40	90	1,00	0,26	1,00	0,26	1,70%	0,01%	75
16	2	40	40	110	7,07	0,6	7,07	0,60	0,36%	0,00%	214
16	2	40	40	130	15,82	0,75	15,82	0,75	0,64%	0,00%	379
16	2	40	40	150	1,46	0,23	1,46	0,23	2,09%	0,00%	125