

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

GABRIEL AUGUSTO DA SILVA

**ANÁLISE GRÁFICA DO CAVACO OBTIDO NO
TORNEAMENTO COM DIFERENTES GEOMETRIAS DE
FERRAMENTA E PARÂMETROS DE CORTE**

SÃO CARLOS
2025

GABRIEL AUGUSTO DA SILVA

**ANÁLISE GRÁFICA DO CAVACO OBTIDO NO
TORNEAMENTO COM DIFERENTES GEOMETRIAS DE
FERRAMENTA E PARÂMETROS DE CORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ing- Carlos Eiji Hirata Ventura

SÃO CARLOS
2025

Aos meus queridos amigos, pelo apoio incondicional. À minha mãe e ao meu irmão, pelo incentivo constante e por sempre acreditarem em mim. À minha companheira, cuja presença e suporte tornaram esta jornada mais leve e significativa. E, principalmente, ao meu amado pai, meu exemplo maior que, mesmo não estando mais fisicamente ao meu lado, continua presente em cada uma das minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Carlos Eiji Hirata Ventura, por sua cuidadosa orientação, sempre pautada pela atenção minuciosa aos detalhes, pela disposição em refletir comigo sobre cada questão e pelo valioso hábito de transformar dúvidas em raciocínios compartilhados. Sua abordagem, marcada pelo diálogo e pelo incentivo à construção conjunta do conhecimento, fez toda a diferença neste trabalho. Sou grato por seu comprometimento e por demonstrar, em cada correção e sugestão, o quanto realmente se importava com o desenvolvimento deste projeto.

Aos amigos e colegas que contribuíram de diferentes formas, meu sincero agradecimento.

RESUMO

Devido à geometria do contato ferramenta-cavaco, tensões não uniformes ocorrem em diferentes regiões da ferramenta e melhor compreendê-las é fundamental para a determinação da geometria da ferramenta e ajuste adequado dos parâmetros de corte. A caracterização deste contato por meio da análise geométrica do cavaco corresponde a uma maneira eficiente de se conhecer os esforços atuantes. Dessa maneira, neste trabalho buscou-se obter, por meio de modelagem assistida por computador (CAD), a geometria de cavacos obtidos a partir de diferentes condições, com variação de avanço, raio de ponta e raio de aresta. Em posse das espessuras do cavaco ao longo do comprimento de contato e de sua respectiva área, foi possível a determinação da pressão específica de corte e da força de corte a partir da aplicação da equação proposta por Kienzle. Conforme esperado, as análises mostraram que o aumento do avanço e a diminuição do raio de ponta levam ao aumento da espessura do cavaco em termos gerais, causando diminuição da pressão específica. Além disso, o aumento do raio de aresta e o aumento do avanço levam ao aumento da área de contato entre ferramenta e cavaco, bem como ao aumento da força de corte.

Palavras-chave: Usinagem, CAD, Modelo geométrico, Força de corte.

ABSTRACT

Due to the geometry of the tool-workpiece contact, non-uniform stresses occur in different regions of the tool and a better understanding of them is essential for determining the tool geometry and adjusting the cutting parameters. The characterization of this contact through the geometric analysis of the chip is an efficient way to understand the acting forces. Thus, this work sought to obtain, through computer-aided modeling (CAD), the geometry of chips obtained from different conditions, with variation of feed, nose radius and edge radius. With the chip thicknesses along the contact length and its respective area, it was possible to determine the specific cutting pressure and the cutting force by applying the equation proposed by Kienzle. As expected, the analyses showed that increasing the feed and decreasing the nose radius lead to an increase in the chip thickness in general terms, causing a decrease in the specific pressure. In addition, increasing the edge radius and increasing the feed lead to an increase in the contact area between the tool and the chip, as well as an increase in the cutting force.

Keywords: Machining, CAD, Geometric model, Cutting force.

LISTA DE SÍMBOLOS

A_F	Área de contato entre ferramenta de corte e peça na face da ferramenta
A_r	Área de contato entre ferramenta de corte e peça no raio de aresta
A	Área de contato total entre ferramenta de corte e peça
F_c	Força de corte
R_Z	Rugosidade superficial
V_c	Velocidade de corte
a_p	Profundidade de corte
f	Avanço por volta
h	Espessura de corte
k_s	Pressão específica de corte
r_n	Raio de aresta da ferramenta de corte
r_ϵ	Raio de ponta da ferramenta de corte
α_o	Ângulo de folga
γ_o	Ângulo de saída
κ_r	Ângulo de posição
ϵ_r	Ângulo de ponta
θ	Posição angular

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS	11
1.1.1 Objetivo Geral	11
1.1.2 Objetivos Específicos	11
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3 – METODOLOGIA	15
3.1 CRIAÇÃO DO MODELO TRIDIMENSIONAL DA FERRAMENTA DE CORTE	15
3.1.1 Definição dos parâmetros	15
3.1.2 Criação do corpo da ferramenta	17
3.1.3 Criação do Plano Ortogonal	23
3.1.4 Aplicação dos ângulos de folga e de saída	26
3.1.5 Criação do plano de corte	26
3.1.6 Aplicação do ângulo de inclinação	27
3.1.7 Correção do corpo da ferramenta	28
3.2 CRIAÇÃO DO MODELO DO TARUGO	34
3.2.1 Exportação e derivação do Esboço 9	34
3.2.2 Modelagem do arquivo Tarugo.ipt	36
3.2.3 CRIAÇÃO DO MODELO DA MONTAGEM FERRAMENTA-CAVACO	39
3.3 CRIAÇÃO DO CAVACO	41
3.4 PARÂMETROS FIXADOS	45
3.5 ANÁLISE DA ESPESSURA DE CORTE	46
3.6 OBTENÇÃO DA PRESSÃO ESPECÍFICA PARA DIFERENTES MATERIAIS	53
3.7 OBTENÇÃO DA ÁREA DA SUPERFÍCIE DE CONTATO FERRAMENTA-CAVACO	53
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1 ANÁLISE DA ESPESSURA DE CORTE	55
4.2 ANÁLISE DA ÁREA DA SUPERFÍCIE DE CONTATO FERRAMENTA-CAVACO	59
4.3 ANÁLISE DA PRESSÃO ESPECÍFICA PARA DIFERENTES MATERIAIS	61
4.4 ANÁLISE DA FORÇA DE CORTE PARA DIFERENTES CONDIÇÕES	63

5 – CONCLUSÃO	65
5.1 TRABALHOS FUTUROS	65
REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Dentro do processo de usinagem busca-se maximizar a durabilidade da ferramenta e a qualidade superficial da peça, com o objetivo de reduzir custos sobre o processo, redução que se manifesta não somente na aquisição de ferramentas em menores quantidades, mas também na diminuição do inventário de ferramentas em almoxarifado e no menor tempo de máquina parada para substituição da ferramenta. A vida útil da ferramenta está diretamente relacionada a muitas variáveis, como por exemplo ao controle de temperatura durante a operação, às condições de lubrificação, à afinidade química dos materiais e aos esforços aplicados, que são influenciados principalmente pelas características do cavaco, como sua espessura.

Neste sentido, diversos autores buscam otimizar os processos com base na análise e previsão da força de corte. Li, Zhang e Zheng (2004) utilizaram modelos matemáticos de predição de força para encontrar os parâmetros ideais e concluíram que o efeito de otimização, indicador numérico que compara a força máxima pré otimização com as força pós otimização e indica o quão próximo a otimização chegou do ideal, atingiu valores superiores a 90% e ainda aumentou a produtividade em mais de 30% em alguns casos. Em uma abordagem semelhante, mas incrementando validações empíricas, Zhao *et al.* (2008) utilizaram modelos computacionais para prever a força de corte e mantê-la em valores aceitáveis. Concluíram que os parâmetros de usinagem deveriam variar no tempo para manter a força constante, testaram o modelo proposto e validaram empiricamente, provando o valor da compreensão da força de corte nos processos de otimização. Por fim, Choudhury e Appa Rao (1999) utilizaram a força de corte como variável em seu modelo matemático para otimizar o tempo de vida da ferramenta de corte, que foi melhorado em até 30% e validado empiricamente.

Além de influenciar a durabilidade da ferramenta, as forças de usinagem também estão diretamente relacionadas à potência consumida. Assim, a compreensão robusta e detalhada da espessura de corte pode ajudar a controlar os esforços de usinagem, podendo reduzir custos pela vida útil da ferramenta, pela manutenção e pelo consumo energético, que pode ser reduzido em até 48% com a escolha de parâmetros de usinagem adequados, afirmam Denkena, Helmecke e Hülsemeyer (2015).

Desta forma, o presente trabalho busca propor um modelo computacional que seja capaz de, através da entrada de parâmetros de usinagem e geométricos da ferramenta, fornecer o perfil preciso do cavaco não deformado e facilitar a compreensão dos esforços que atuarão sobre a ferramenta, e especialmente, como esses esforços estão distribuídos ao longo do comprimento de contato.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é a elaboração de um modelo gráfico computacional que seja capaz de evidenciar de maneira precisa o perfil do cavaco não deformado gerado em processo de torneamento e, através deste modelo e com apoio de dados da bibliografia, encontrar não só os esforços, mas também sua distribuição ao longo das diversas regiões do contato ferramenta-cavaco.

1.1.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos, pode-se destacar:

- Obter um modelo parametrizado de ferramenta de corte em software CAD, que, mediante alterações dos parâmetros geométricos e de usinagem, responda com a rápida obtenção de modelos de cavacos não deformados;
- Mapear valores de espessura ao longo do comprimento de contato do cavaco obtido para diferentes condições;
- Mapear a área de contato entre ferramenta e peça para diferentes parâmetros de usinagem;
- Obter a pressão específica e a força de corte para as condições obtidas na literatura;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A formulação com base na pressão específica de corte é uma das maneiras teóricas mais utilizadas para o cálculo da força de corte F_c . Machado *et al.* (2015) explicam que no século XX diversos pesquisadores constataram que as componentes da força de usinagem (e em especial a força de corte) variam de maneira quase linear em função da área de corte. De fato, como mostra Ferraresi (1977), o modelo atual apresenta F_c como resultado do produto entre a pressão específica de corte k_s e a área de secção de corte A , como mostra a Equação 1

$$F_c = A \cdot k_s \quad (1)$$

Assim, tanto a área da secção de corte quanto a pressão específica são variáveis de interesse na definição de F_c , sendo, portanto, de extrema importância entender quais parâmetros são capazes de afetá-las.

Machado *et al.* (2015) explicam que a pressão específica pode variar com diversos fatores. Alguns deles são mais fáceis de considerar no modelo a partir de dados obtidos empiricamente e tabelados, como, por exemplo, o material da peça: em aços carbonos, o aumento do percentual de carbono aumenta k_s , e em ligas diversas, a presença de P, Pb, Bi e MnS leva à diminuição de k_s . Outros, são mais difíceis de serem considerados, como, por exemplo, a existência de material deformado na peça que não se transforma em cavaco, mas escorrega entre a peça e a superfície de folga devido ao retorno elástico, levando ao aumento da energia consumida, especialmente em condições de avanços pequenos. Ferraresi (1977) aponta que a área da secção de corte é diretamente afetada pela espessura de corte h (que, por sua vez, é afetada pelo avanço) e pela geometria da ferramenta, mas apresenta o cálculo de A através do produto entre a profundidade de usinagem a_p e o avanço f como uma alternativa simplificada para o cálculo da área. Por outro lado, não é tão simples analisar a F_c em função de A e k_{s1} , separadamente. Ambos os autores citados apresentam a equação de Kienzle (Equação 2) como mecanismo para o cálculo de k_s , onde k_{s1} e z são obtidos empiricamente e dependem de fatores materiais e geométricos.

$$k_s = k_{s1} \cdot h^{-z} \quad (2)$$

Observa-se, entretanto, que h impacta simultaneamente k_s e A . Se por um lado a espessura de corte faz aumentar A , o que segundo a Equação 1 faria aumentar F_c , por outro lado, faz diminuir k_{s1} , segundo a Equação 2, conseqüentemente diminuindo F_c , segundo a Equação 1. Assim, fica evidente que o avanço f , parâmetro responsável por definir h , é de extrema importância no cálculo de F_c . Comumente, pode-se deduzir erroneamente que o aumento de h causado pelo aumento de f levará ao aumento linear dos esforços e, por conseguinte, do consumo de energia. Entretanto, nem sempre essas deduções estão

corretas. Por exemplo, a energia específica representa a energia necessária para remover determinado volume de material e tende a diminuir com o aumento da espessura de corte, explica Balogun e Mativenga (2014).

A expectativa dos resultados pode ser construída de acordo com a análise de autores que conduziram abordagens experimentais. Jadhav e Jadhav (2014) verificaram experimentalmente os impactos do avanço, da profundidade de usinagem e da velocidade de corte sobre a força de corte e a rugosidade superficial, através de análise de variância, e concluíram que a força de corte cresce quase linearmente com o aumento da profundidade de usinagem, entre 0,25 mm e 0,75 mm, além de crescer com o avanço, constatado como o parâmetro mais influente. Concluíram também que condições ótimas foram atingidas com avanço de 0,18 mm e profundidade de usinagem de 0,5 mm e que a velocidade de corte tem baixa influência sobre a força de corte, não gerando variações expressivas.

Korka, Micloşină e Cojocararu (2013) também elaboraram experimentos para investigar a força de corte. Para tal, tornearam sem fluido tarugos de aço baixo-carbono utilizando ferramentas de aço rápido e variando os parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem) enquanto aferiam a força de corte com um dinamômetro. Corroborando Ferraresi (1977), concluíram que a força de corte teve módulo maior que as demais componentes em todas as condições. Assim como Jadhav e Jadhav (2014) concluíram que a força de corte aumenta com o aumento do avanço, principalmente, mas também com o aumento da profundidade de usinagem. Entretanto, ao contrário de Jadhav e Jadhav (2014), verificaram que a força de corte sofreu uma ligeira queda com o aumento da velocidade de corte. Assim, o avanço foi escolhido como uma das variáveis de estudo deste trabalho, mas a profundidade de usinagem foi mantida fixa, enquanto a velocidade de corte não pôde ser analisada por este modelo.

Por fim, nota-se que a aplicação clássica da Equação 1 apresenta a força de corte como um valor único e distribuído ao longo de todo o comprimento de contato ferramenta-cavaco. Dessa forma, este trabalho propõe estudar as aplicações das Equações 1 e 2 em trechos do cavaco, discretizado em regiões pré-definidas, tendo sido o método computacional escolhido devido aos bons resultados obtidos por outros autores em trabalhos que buscaram calcular a força de corte através da geometria do cavaco. Por exemplo, Otalora-Ortega, Osoro e Arriola (2021) desenvolveram um modelo numérico para simular a usinagem por torno-fresamento, considerando a excentricidade da ferramenta e o perfil da mesma, com fresas toroidais e esféricas. O modelo permitiu determinar com precisão a geometria do cavaco não cortado, validada teoricamente com uma representação CAD, apresentando erros abaixo de 3%. Além disso, os autores realizaram ensaios experimentais para comparar a massa do cavaco e as forças de corte estimadas pelo modelo com os dados medidos, observando correlações satisfatórias, com erros abaixo de 3,5% para a massa e em torno de 12% para as forças de corte.

Os autores Schultheiss *et al.* (2014) também desenvolveram um modelo inovador

para prever a rugosidade média aritmética em operações de torneamento, utilizando um enfoque que combina conhecimentos físicos e empíricos do processo de usinagem. Embora o foco principal do estudo tenha sido a rugosidade superficial, o trabalho abordou também a influência da espessura mínima do cavaco na qualidade da superfície final, um aspecto que se conecta diretamente ao tema deste trabalho. O modelo foi validado experimentalmente em diferentes materiais, incluindo MMC Al-SiCp, ferro fundido, aços convencionais e inoxidáveis, bem como Ti6Al4V, alcançando um erro médio de 6,7%, o que demonstra seu potencial em prever fenômenos complexos na usinagem. Essa abordagem ressalta a importância de modelos generalizáveis que relacionem parâmetros do processo com seu desempenho. Um desses parâmetros pode ser a espessura do cavaco, considerada crucial também por Tools (2021), que observou seus impactos no processo de fresamento e propôs modelos matemáticos que ajudaram a entender como a variação na espessura do cavaco impacta os resultados da usinagem, abordando fatores como eficiência e qualidade do corte, além de sugerir formas de aprimorar o processo por meio do controle mais preciso desse parâmetro, considerando-o essencial para otimizar o desempenho das ferramentas de corte.

Por fim, é importante destacar que algumas variáveis não consideradas pelo modelo teórico podem desempenhar papel de grande impacto sobre os esforços e a operação como um todo. Nesse sentido, Tangjitsitcharoen (2009) explica que as condições de corte, com ou sem fluido, influenciam a temperatura durante o processo de usinagem. O autor investigou os efeitos da velocidade de corte, da profundidade de usinagem e da lubrificação sobre a rugosidade superficial R_z e concluiu que o em condições de corte lubrificado e misto R_z atingiu maiores valores, uma vez que a temperatura baixa torna o material mais difícil de usinar. Concluiu também que, enquanto altas velocidades de corte com lubrificação adequada levam a baixos valores de R_z , em corte seco o R_z aumenta devido ao aumento da temperatura e consequente aumento na taxa de formação de arestas postiças. O autor destaca ainda que o aumento de R_z observado com o aumento de a_p pode ser explicado devido ao aumento das vibrações, ocasionado em consequência do aumento de F_c . Por fim, Tangjitsitcharoen (2009) mostra que os maiores valores de F_c foram obtidos em condições de lubrificação abundante, enquanto foi mais baixo e praticamente igual para condições de lubrificação parcial e sem lubrificação.

3 METODOLOGIA

3.1 CRIAÇÃO DO MODELO TRIDIMENSIONAL DA FERRAMENTA DE CORTE

Ao inicializar o *AutoDesk Inventor 2025*, é necessário criar um novo arquivo com dimensões em milímetros. Isso deve ser feito pelo caminho File > New > New > Standard (mm).ipt > Create, como mostrado nas Figuras 1 e 2

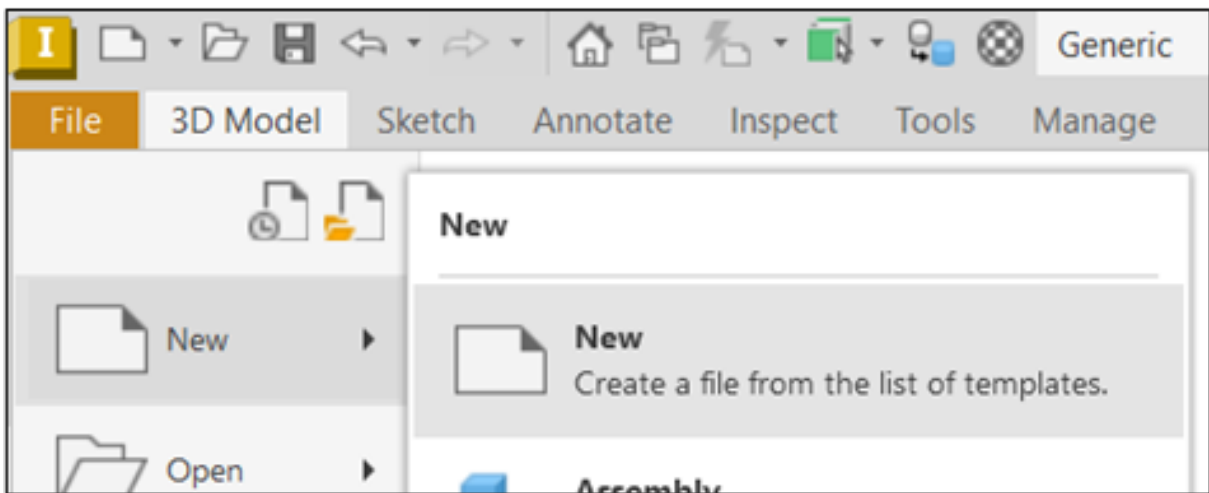


Figura 1 – Procedimento para criação de arquivo .ipt em mm
Fonte: O Autor

3.1.1 Definição dos parâmetros

Para a realização das simulações, o modelo tridimensional da ferramenta precisará ser alterado muitas vezes a fim de testar as diversas variáveis possíveis, como avanço, ângulo de ponta, etc. Modelando a ferramenta com valores absolutos, um novo modelo teria de ser criado para cada simulação, tornando muito maior o tempo necessário para sua execução. O *software* escolhido conta com o recurso de definição de variáveis, chamado “Parameters”. Com esse recurso, é possível criar variáveis, atribuir valores a elas e realizar o desenho da ferramenta utilizando essas variáveis. Quando for necessário alterar os parâmetros da ferramenta, bastará acessar o campo de variáveis e alterar seus valores. Dessa forma, o *software* atualizará o modelo tridimensional automaticamente com os novos valores imputados. Dessa forma, o primeiro passo para a criação do modelo tridimensional da ferramenta é definir algumas variáveis. Essa tarefa pode ser realizada acessando-se o botão mostrado na Figura 3. Feito isso, o usuário deverá clicar sobre a linha “User Parameters”, e depois clicar no botão “Add Numeric”, como mostra a Figura 4

Posteriormente, o usuário deve preencher os campos “Parameter Name”, “Unit Type”, “Nominal Value” e, para manter o arquivo organizado, também o campo “Comment”, onde o usuário pode escrever em detalhes o significado daquela variável. Os demais campos

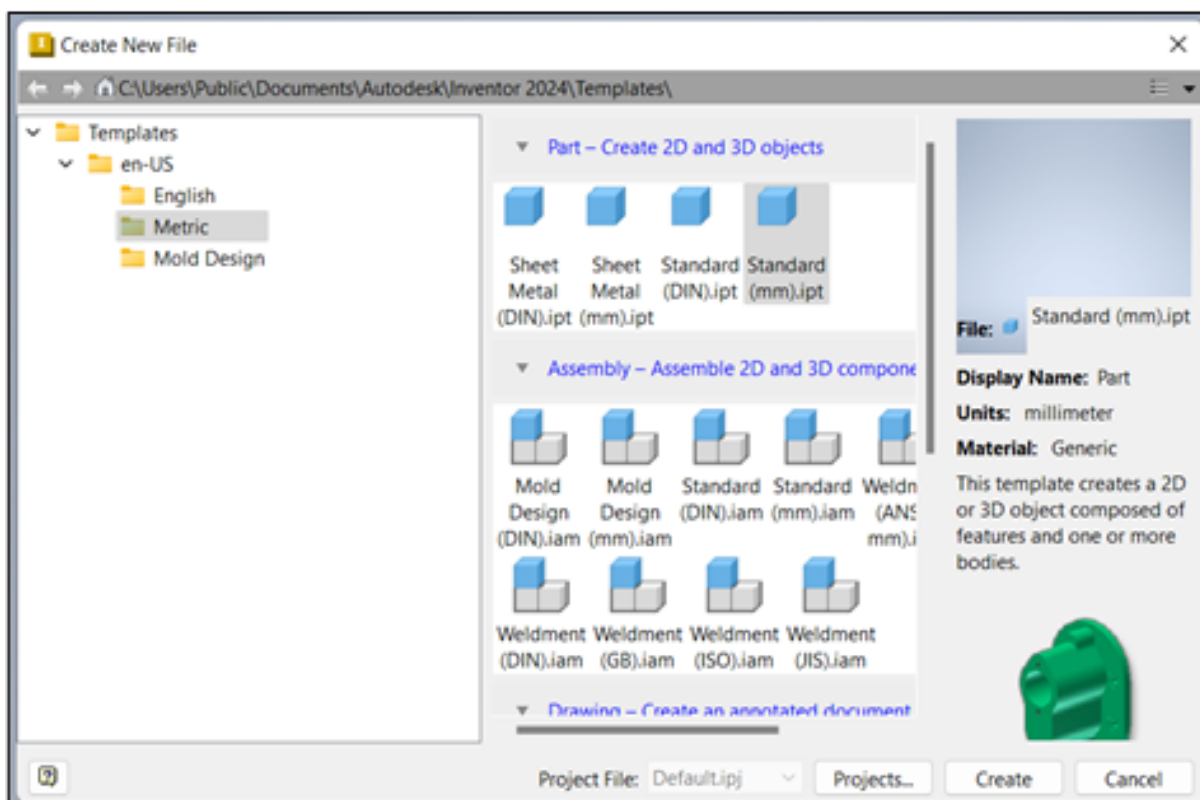


Figura 2 – Procedimento para criação de arquivo .ipt em mm

Fonte: O Autor

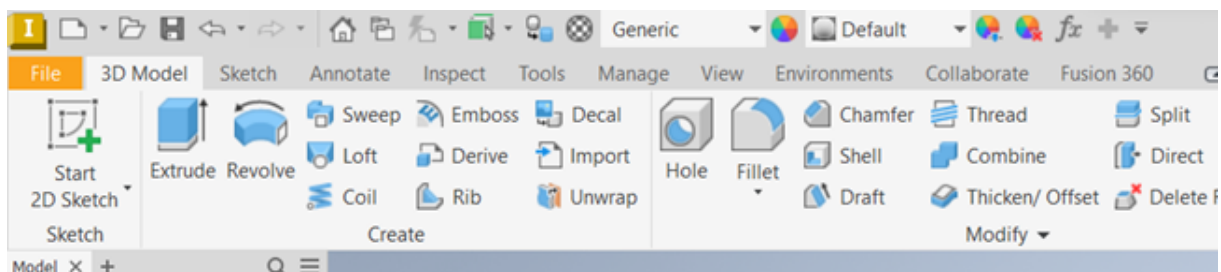


Figura 3 – Acesso ao menu “parameters” no AutoDesk Inventor

Fonte: O Autor

são de preenchimento automático, portanto não demandam qualquer intervenção. Em seguida, o usuário pode clicar em “Add Numeric” para criar mais uma variável ou em “Done” para salvar as alterações e fechar a aba “Parameters”. Para modelar a ferramenta, deve-se criar e dimensionar as variáveis como mostrado na Figura 5. É importante observar que “Beta0” é uma função de “Gama0” e “Alpha0”.

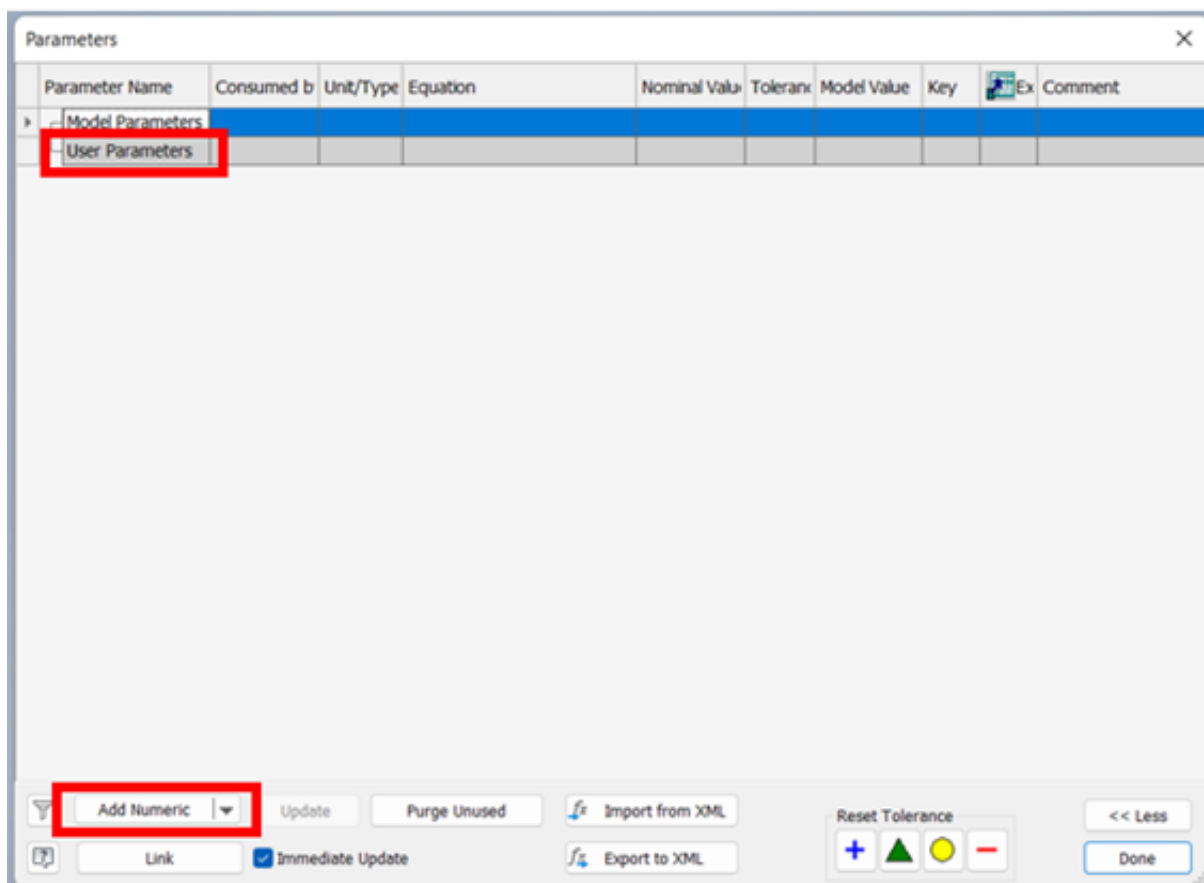


Figura 4 – Criação de parâmetros de usuário no AutoDesk Inventor
 Fonte: O Autor

Parameter Name	Consumed b	Unit/Type	Equation	Nominal Value	Tolerance	Model Value	Key	Ex	Comment
Model Parameters									
User Parameters									
L1		mm	20 mm	20,000000	●	20,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
L2		mm	40 mm	40,000000	●	40,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
L3		mm	15 mm	15,000000	●	15,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Er		deg	80 deg	80,000000	●	80,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Angulo de ponta
Xr		deg	50 deg	50,000000	●	50,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Angulo de posicao
L4		mm	15 mm	15,000000	●	15,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
L5		mm	7 mm	7,000000	●	7,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
L6		mm	1,0 mm	1,000000	●	1,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Gama0	Beta0	deg	-6 deg	-6,000000	●	-6,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Angulo de saida
Alpha0	Beta0	deg	6 deg	6,000000	●	6,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Angulo de folga
LambdaS		deg	-6 deg	-6,000000	●	-6,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Angulo de inclinacao
Beta0		deg	90 deg - Gama0 - Alpha0	90,000000	●	90,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Angulo de cunha
Rponta		mm	0,8 mm	0,800000	●	0,800000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Raio de ponta
Raresta		mm	0,03 mm	0,030000	●	0,030000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Raio da aresta

Figura 5 – Parâmetros que devem ser criados para modelagem da ferramenta e seus valores

Fonte: O Autor

3.1.2 Criação do corpo da ferramenta

Para criar o corpo da ferramenta, deve-se clicar em "Start 2D Sketch"(Figura 6a) e selecionar o "Plano XZ"(Figura 6b) para criar o Sketch 1.

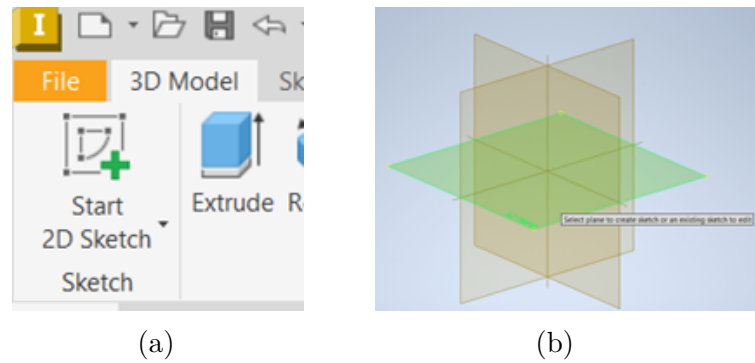


Figura 6 – Inicialização do sketch e seleção do plano

Depois, é necessário selecionar a ferramenta "Line" (Figura 7a) e clicar no centro do sistema de coordenadas (Figura 7b).

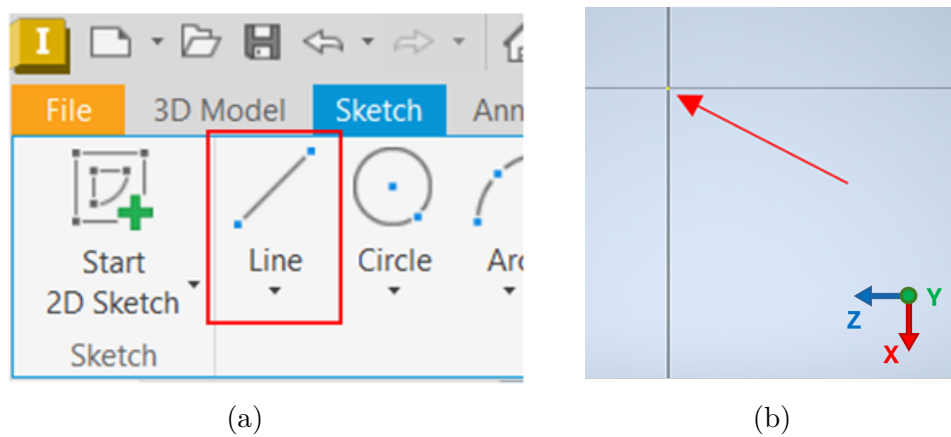


Figura 7 – Localização do botão da ferramenta "Line" (a) e seleção do centro do sistema de coordenadas para criação do sketch (b)

Deve-se criar um polígono no plano, garantindo que apenas as duas retas mostradas na Figura 8 nas posições acima e à esquerda estejam na cor preta, uma vez que essa cor significa que uma restrição foi adicionada. Neste caso em específico, as restrições são de paralelismo aos eixos do sistema de coordenadas.

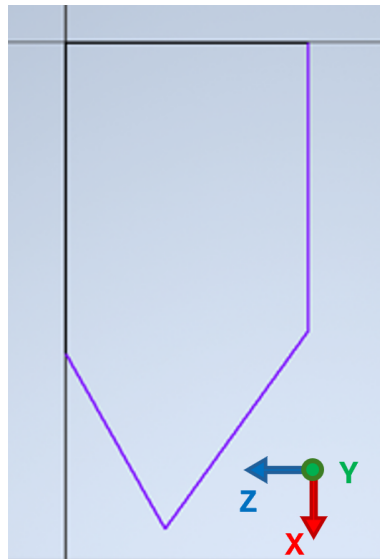


Figura 8 – Geometria geral do Sketch 1

Fonte: O Autor

Posteriormente deve-se clicar no ícone “Dimension” e nas retas do sketch para atribuir dimensões a elas, como mostra a Figura 9a. Posteriormente, pode-se clicar sobre a dimensão e atribuir valor a ela, como mostra a Figura 9b

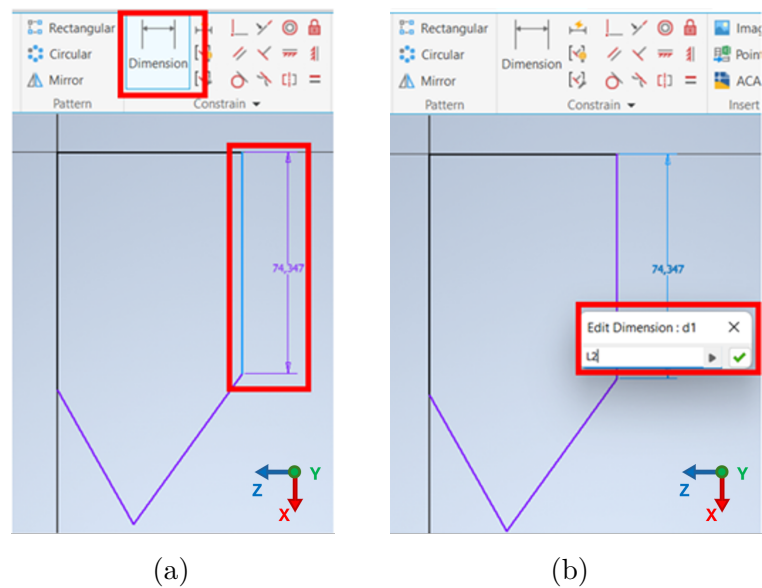


Figura 9 – Localização do ícone da ferramenta “Dimension” e primeira reta a ser cotada (a); Como inserir um parâmetro como cota (b)

Posteriormente, é necessário criar uma reta horizontal, clicar com o botão direito sobre ela e defini-la como “Construction” (uma reta de referência) para tonar possível a declaração do ângulo de posição, como mostra a Figura 10.

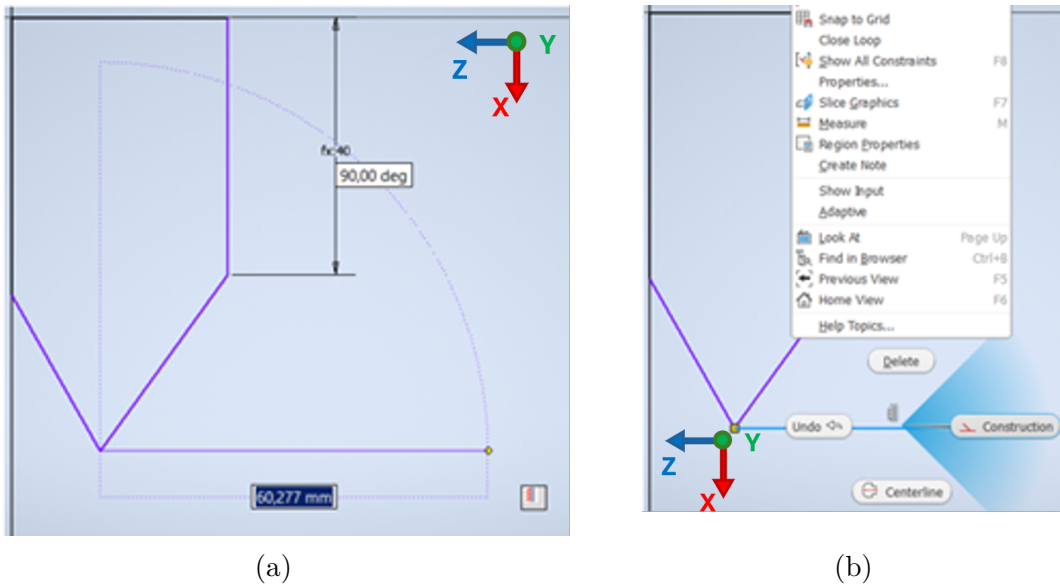


Figura 10 – localização da reta criada como referência horizontal (a); alteração da reta para o formato “Construction” (b)

A seguir, selecionando a ferramenta “Dimension” e clicando na reta recém-criada e na reta inclinada mais próxima, é possível criar uma dimensão de ângulo, que deve ser declarada com a variável “Xr”, como mostra a Figura 11.

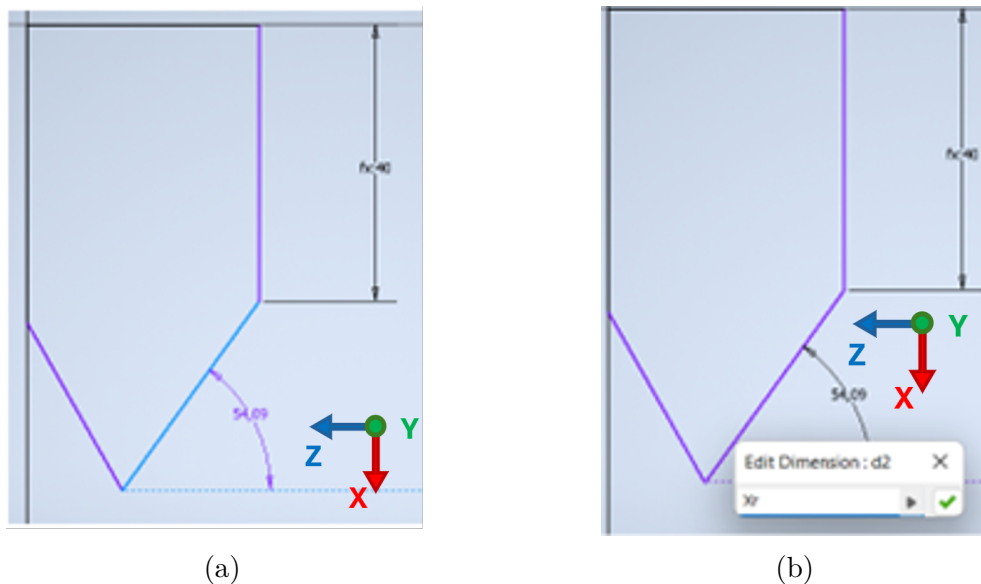


Figura 11 – Criação da dimensão ângulo na reta (a); conexão da dimensão com o valor da variável Xr (b)

Finalmente, as demais retas do sketch precisam ter dimensões atribuídas, utilizando-se as variáveis mostradas na Figura 12.

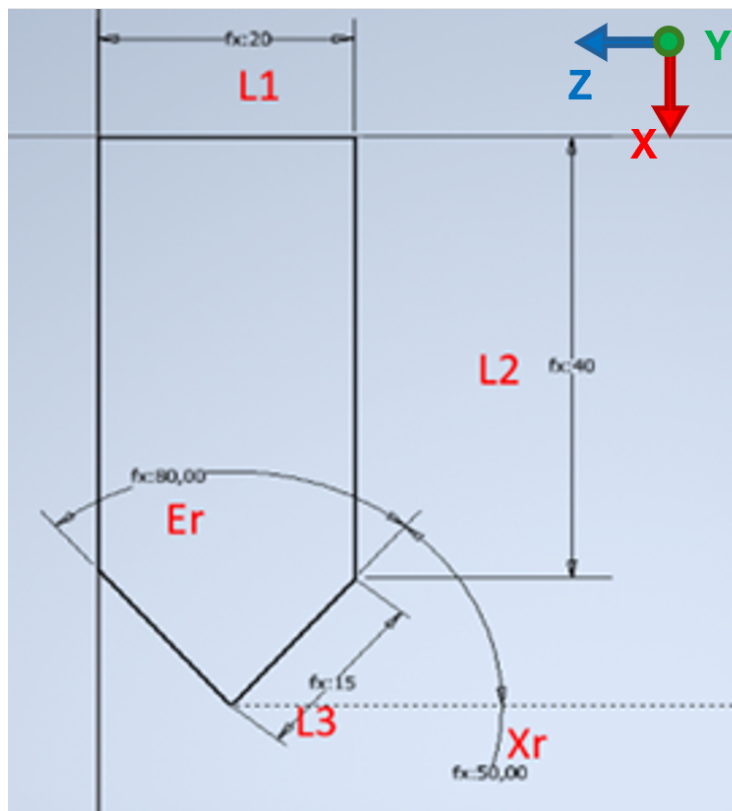
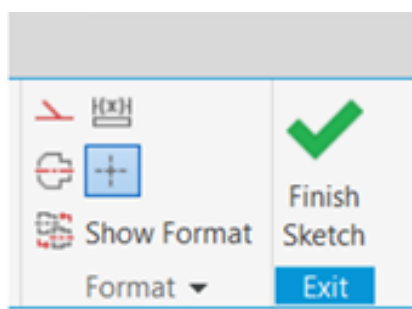
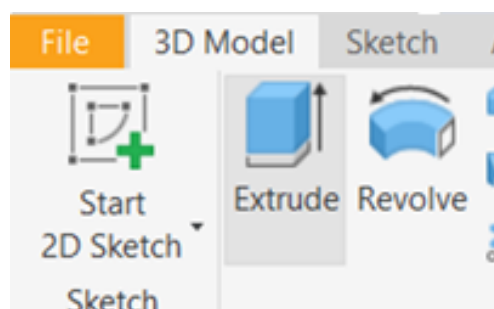


Figura 12 – Retas do Sketch 1 e as variáveis às quais suas dimensões devem ser conectadas
 Fonte: O Autor

Em seguida, deve-se clicar em "Finish Sketch"(Figura 13a), selecionar a ferramenta "Extrude"(Figura 13b, e preencher o campo "Distance A" com o valor "L4" (Figura ??)



(a)



(b)

Figura 13 – Botão "Finish Sketch" para conclusão do Sketch 1 (a) e botão "Extrude" para a extrusão do sketch (b)

De maneira análoga aos passos descritos anteriormente, deve-se selecionar a superfície da ferramenta, criar um retângulo (Figura 14) e realizar a operação de extrusão com distância de L6 (Figura 15)

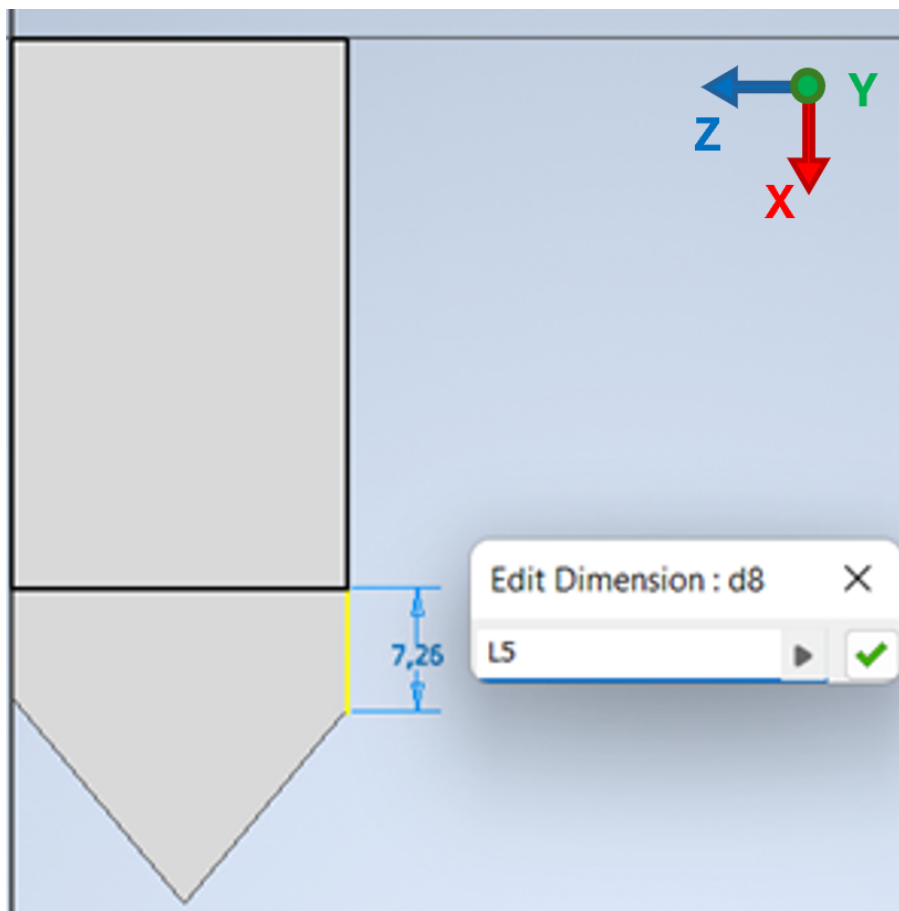


Figura 14 – Criação do retângulo no Esboço 2
 Fonte: O Autor

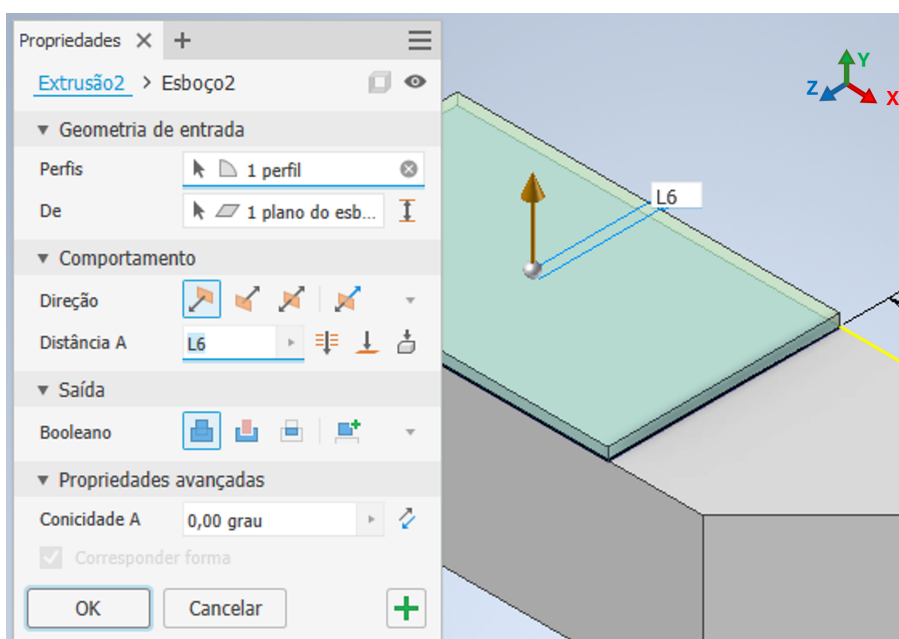


Figura 15 – Parametrização da Extrusão 2
 Fonte: O Autor

Finalmente é obtido o corpo da ferramenta. Deve-se obter uma Árvore de Operações

e um sólido como os mostrados na Figura 16.

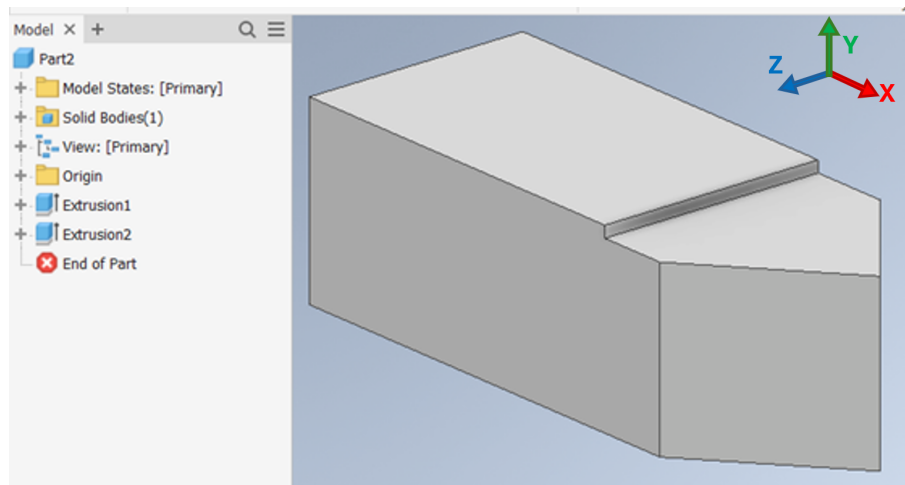


Figura 16 – Sólido obtido até essa etapa e árvore de comandos (à esquerda)

Fonte: O Autor

3.1.3 Criação do Plano Ortogonal

Um novo Sketch (Esboço 3) deve ser aberto na ponta da ferramenta, na qual duas retas do tipo “Construction” devem ser criadas, ambas com dimensões $L/2$. Uma das retas deve ser paralela à aresta de corte, enquanto a outra deve ser perpendicular à primeira e partir de seu ponto médio. Na intersecção de ambas e na extremidade da segunda, um ponto deve ser criado (Figura 17a). Este Sketch deve ser concluído (Esboço 3), e um novo (Esboço 4) deve ser iniciado (Figura 17b).

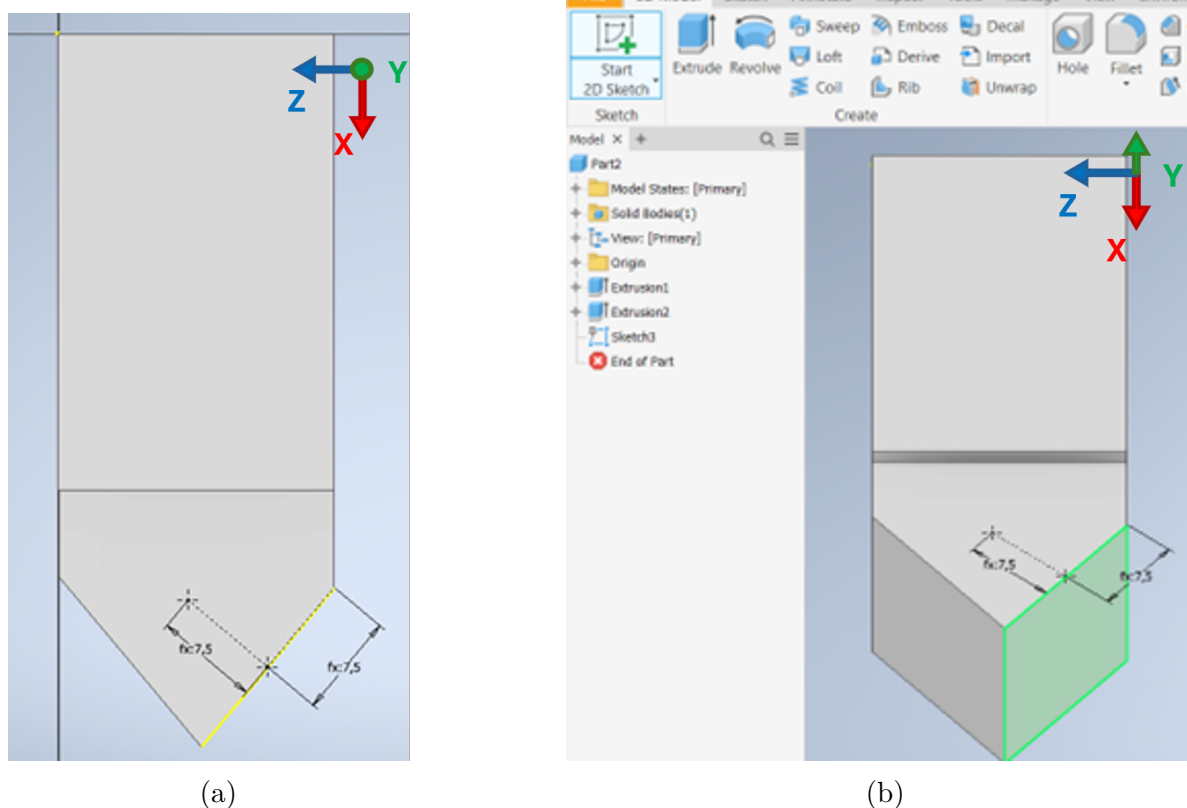


Figura 17 – Execução do Esboço 3 (a); Superfície a partir do qual deve-se iniciar o Esboço 4 (b)

No Esboço 4, uma reta do tipo “construction” deve ser criada na direção do eixo Y, com dimensão qualquer. Em sua extremidade, um ponto deve ser criado (Figura 18), e o esboço deve ser concluído.

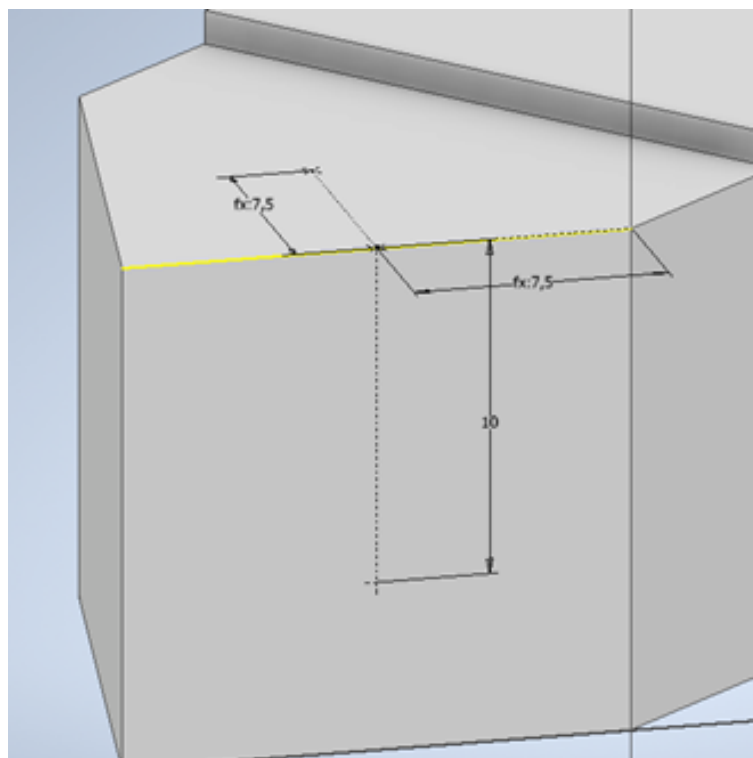
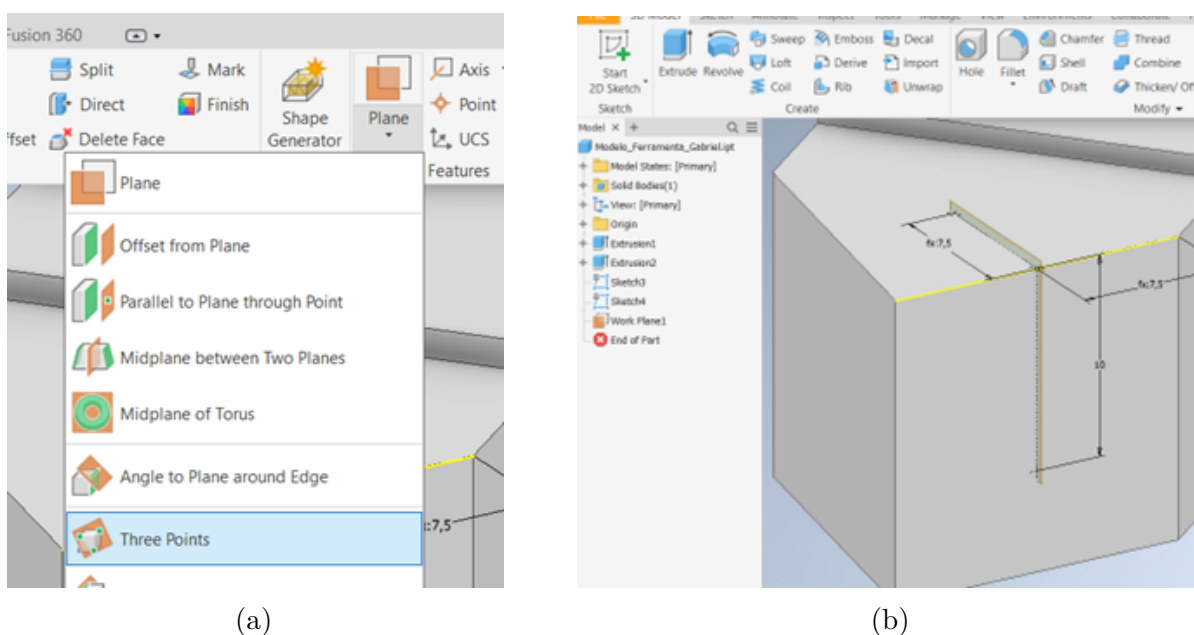


Figura 18 – Resultado do Esboço 4 (reta vertical)
 Fonte: O Autor

Acessando a ferramenta disponível em File > Plane > Three Points (Figura 19a) e clicando-se nos 3 pontos definidos, é possível criar o Plano Ortogonal (Figura 19b). Por fim, basta apenas renomeá-lo na Árvore de Operações para “Plano Ortogonal”.



(a)

(b)

Figura 19 – Seleção da ferramenta “Plane Three Points” (a); Localização do Plano Ortogonal, posicionado com relação aos pontos criados nos Esboços 3 e 4 (b)

3.1.4 Aplicação dos ângulos de folga e de saída

Um novo Sketch (Esboço 5) deve ser iniciado no Plano Ortogonal e executado da maneira como mostra a Figura 20.

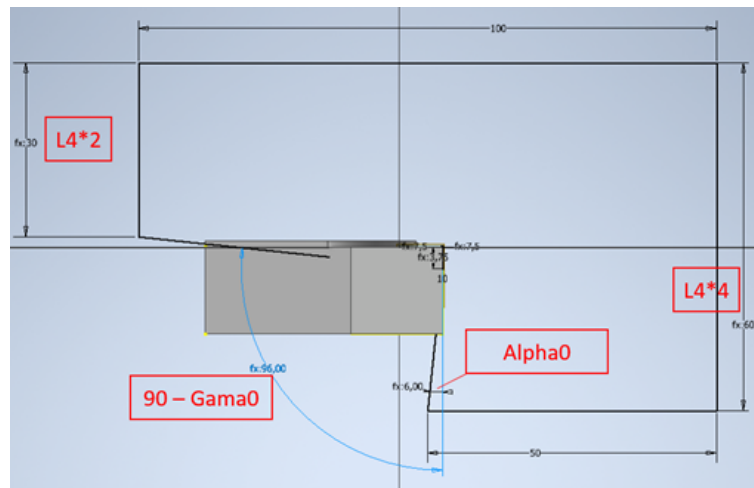


Figura 20 – Execução do Esboço 5 e os valores que devem ser adotados em suas dimensões
Fonte: O Autor

Concluído o Esboço 5, o mesmo deve ser selecionado para execução da Extrusão 3, mostrada na Figura 21.

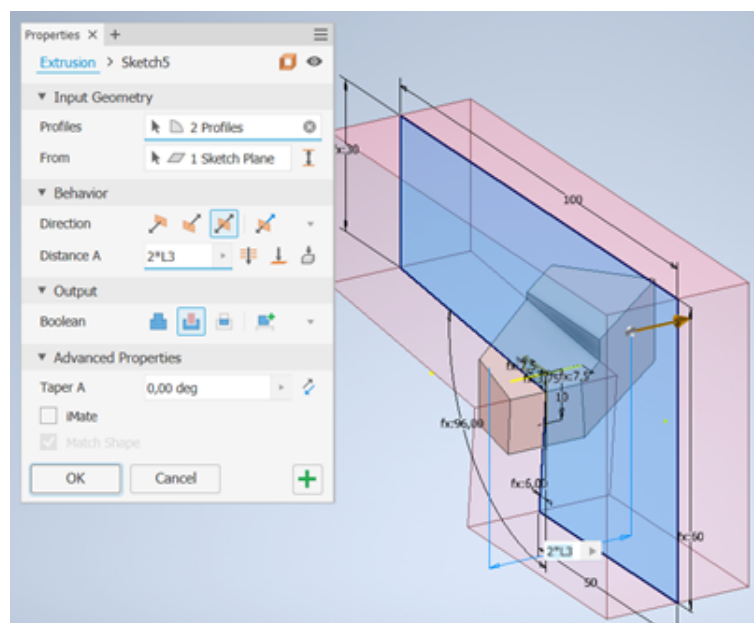


Figura 21 – Parâmetros que devem ser aplicados na Extrusão 3
Fonte: O Autor

3.1.5 Criação do plano de corte

Para criar o plano de corte, deve-se acessar a ferramenta localizada em "Arquivo» "Plano» "Ângulo em plano ao redor da aresta" e selecionar a aresta de corte, como mostra a Figura 22.

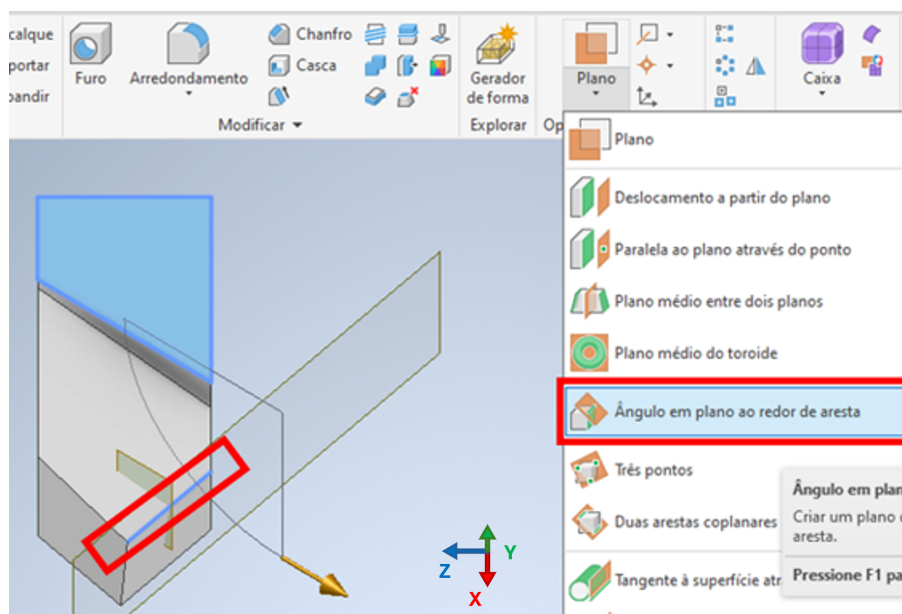


Figura 22 – Localização da ferramenta e seleção da aresta de corte para criação do Plano de Corte

Fonte: O Autor

3.1.6 Aplicação do ângulo de inclinação

Para aplicar o ângulo de inclinação no sólido, é necessário criar o Esboço 6, mostrado na Figura 23, no Plano de Corte.

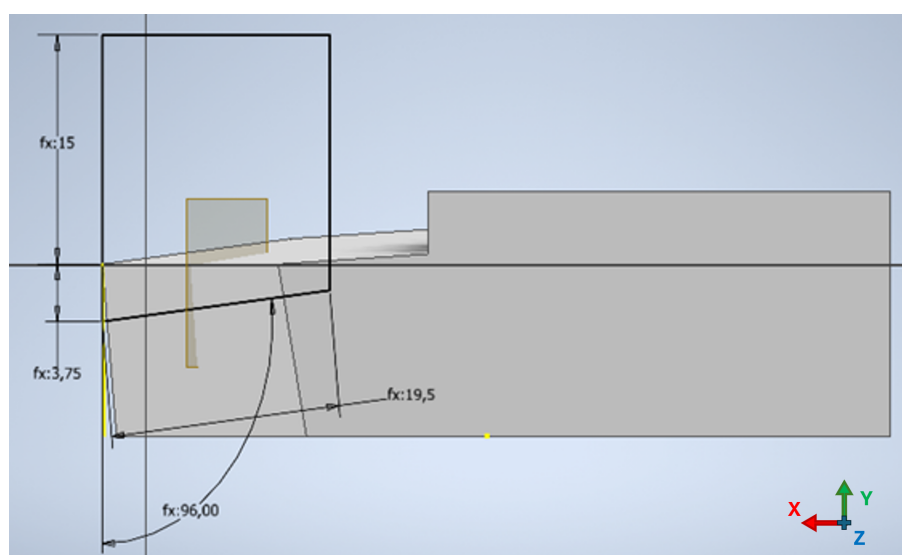


Figura 23 – Execução do Esboço 6 no Plano de Corte e suas dimensões

Fonte: O Autor

Após criado o Esboço 6, deve-se selecionar o mesmo e executar a Extrusão 4 com os parâmetros mostrados na Figura 24.

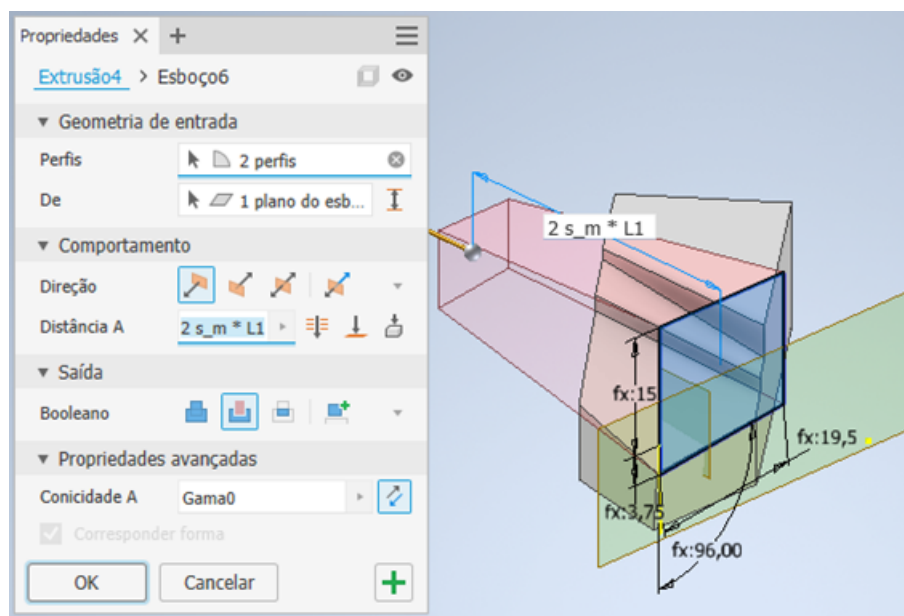


Figura 24 – Parâmetros utilizados na Extrusão 4, aplicada sobre o Esboço 6
Fonte: O Autor

3.1.7 Correção do corpo da ferramenta

As diversas operações de extrusão criadas tendem a deixar a ferramenta com cortes irregulares. Dessa forma, é necessário realizar a correção destes cortes. Para tanto, deve-se criar o Esboço 7 na lateral da ferramenta, como mostram as Figuras 25 e 26.

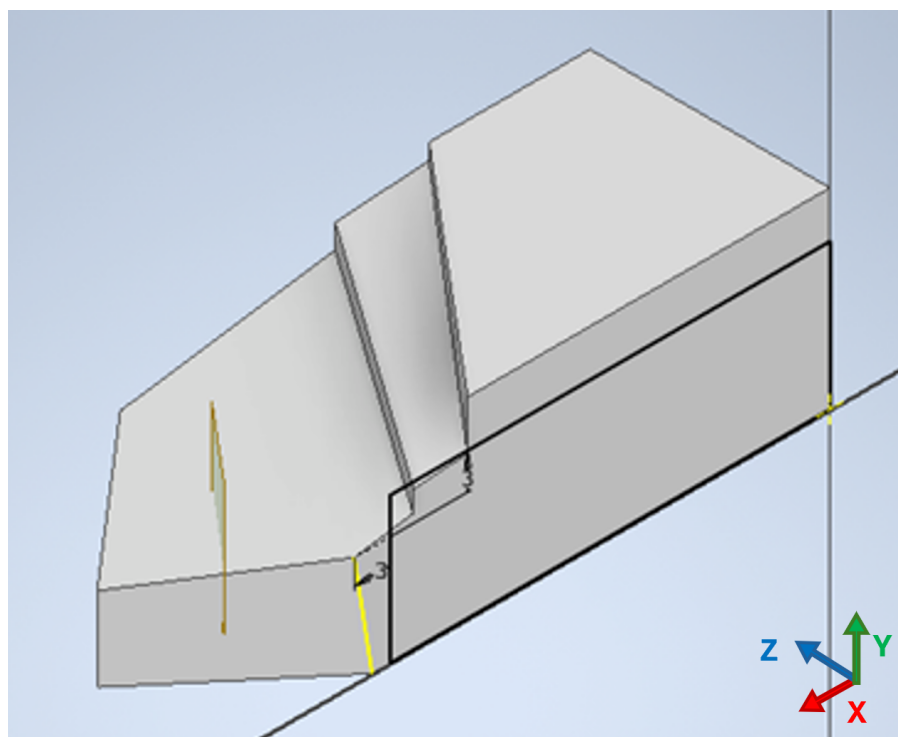


Figura 25 – Criação do Esboço 7 em vista isométrica
Fonte: O Autor

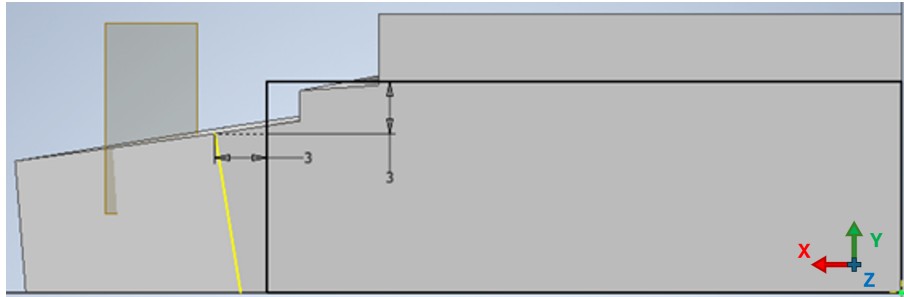


Figura 26 – Criação do Esboço 7 e suas dimensões, em vista frontal
Fonte: O Autor

Posteriormente, deve-se selecionar o Esboço 7 e executar um procedimento de extrusão (Extrusão 5) utilizando-se os parâmetros mostrados na Figura 27.

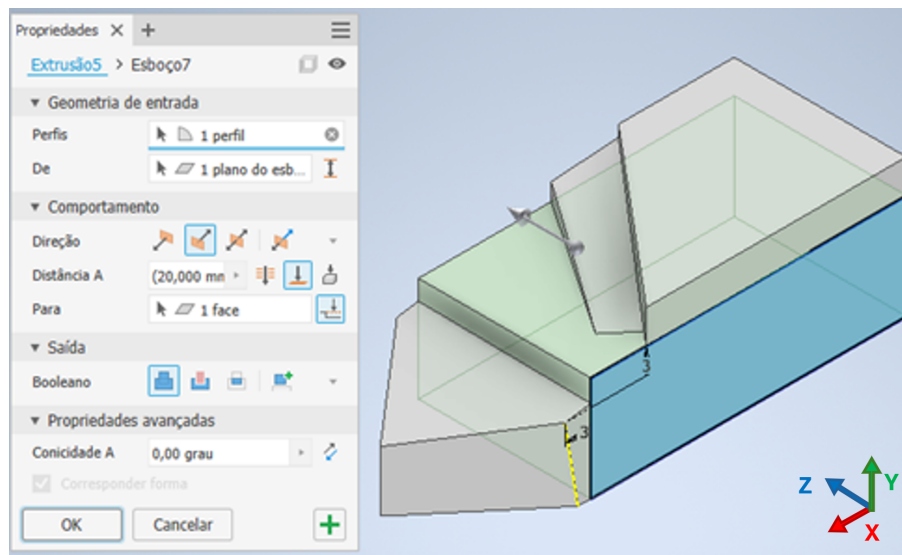


Figura 27 – Aplicação da Extrusão 5 sobre o Esboço 7 e seus parâmetros
Fonte: O Autor

A fim de remover o excesso de material irregular no topo da ferramenta, deve-se criar o Esboço 8 e executar um procedimento de extrusão (Extrusão 6) utilizando-se os parâmetros mostrados nas Figuras 28a, 28b e 29. É importante observar que a dimensão mostrada na reta direita deve ser declarada como L4

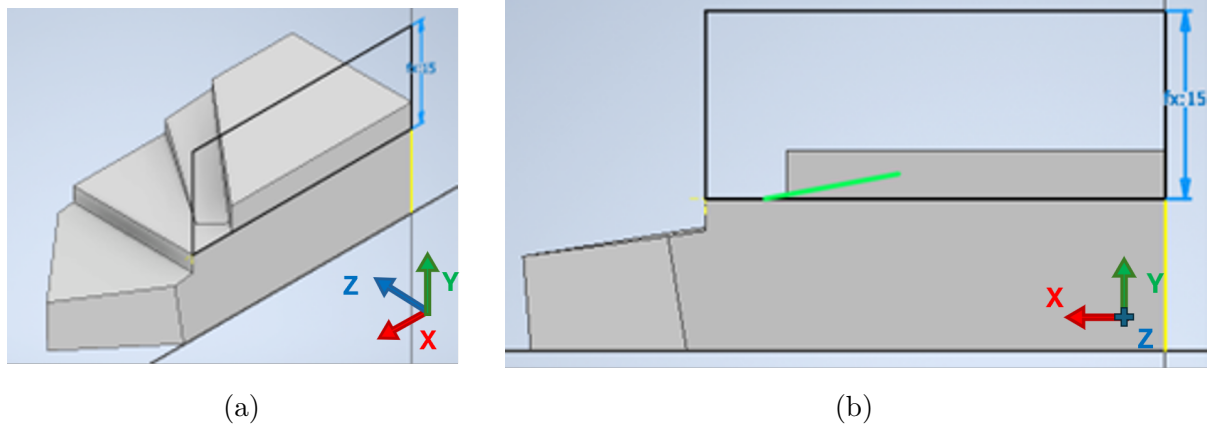


Figura 28 – Criação do Esboço 8 e dimensões utilizadas para posicionamento, representado em vista isométrica (a) e em vista frontal (b)

Fonte: O Autor

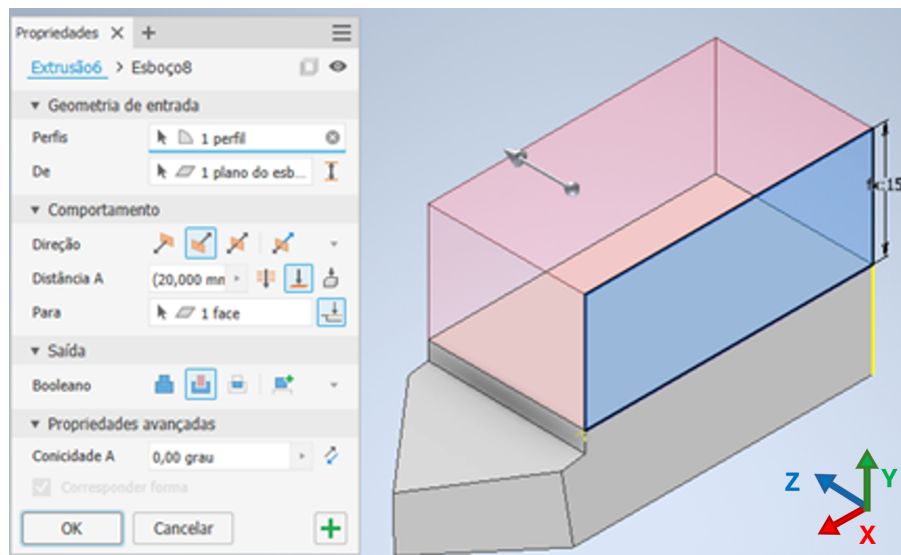


Figura 29 – Aplicação da Extrusão 6 sobre o Esboço 8 e seus parâmetros

Fonte: O Autor

Por fim, resta apenas criar um raio de aresta, o que pode ser feito clicando-se na opção "Arredondamento" e na aresta da ferramenta de corte. Por fim, basta inserir a dimensão "Raresta", como mostra a Figura 30

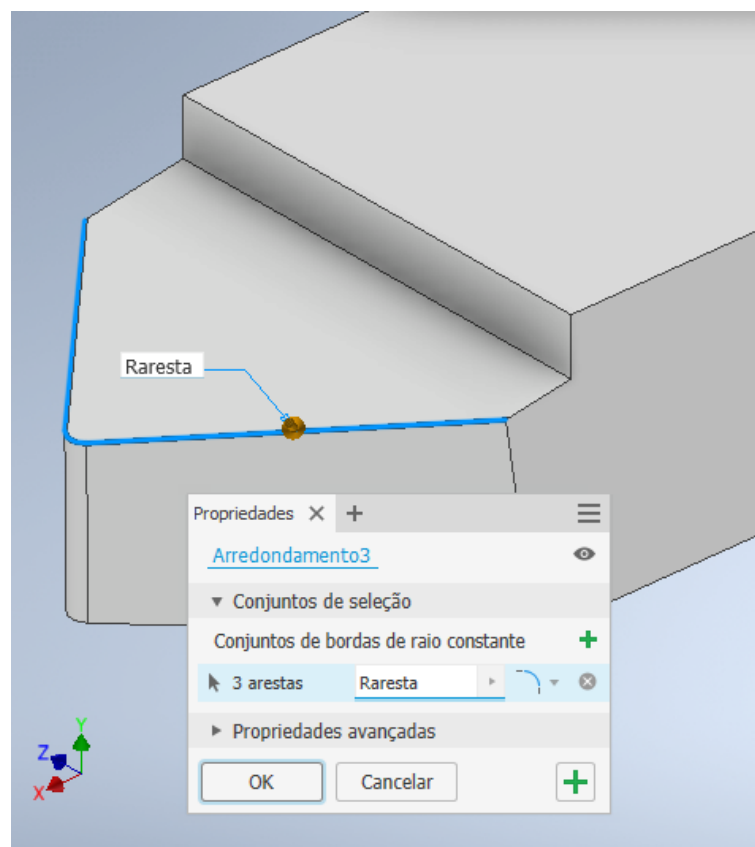


Figura 30 – Criação do raio de aresta
Fonte: O Autor

Finalmente, o modelo da ferramenta está finalizado. Entretanto, para modelar a peça, se faz necessário criar um esboço auxiliar. Primeiramente, deve-se iniciar um esboço XZ (paralelo ao Plano de Referência). Neste esboço, deve-se desenhar a projeção da ferramenta no Plano de Referência, como mostra a Figura 31. É fundamental utilizar as ferramentas de restrição, para que o esboço sempre acompanhe a projeção da ferramenta. Este esboço deve ser renomeado para Esboço 9.

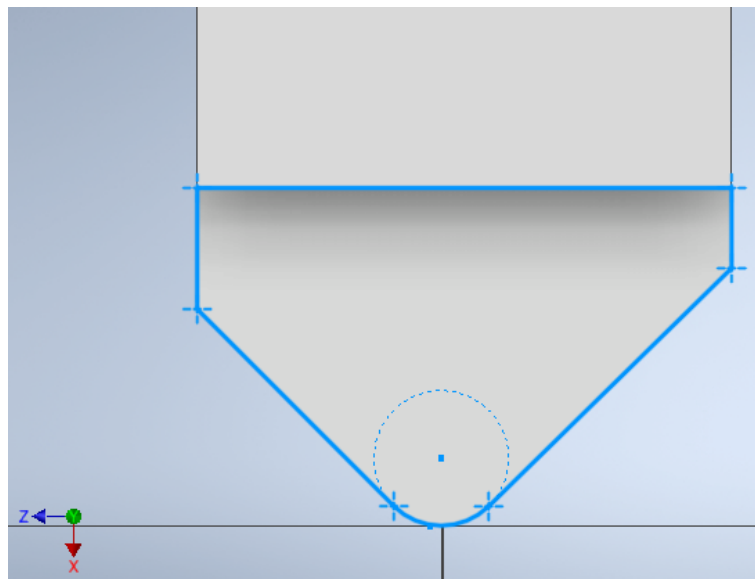


Figura 31 – Criação do Esboço 9, que servirá de referência na criação do tarugo
Fonte: O Autor

Posteriormente, é necessário criar três planos auxiliares, que serão utilizados na criação da montagem (posicionamento da ferramenta no tarugo). Como mostra a Figura 32, é preciso criar um plano paralelo ao Plano XZ, e que passe exatamente pela ponta da ferramenta, conhecido na usinagem por Plano de Referência. Para manter a organização da árvore de operações, é importante renomear este plano para Plano Auxiliar 1. A criação deste plano pode ser realizada selecionando-se a ferramenta “Plano” (Figura 33a), clicando na superfície superior do sólido (Figura 33b) e depois na curva do Esboço 9 (Figura 33c).

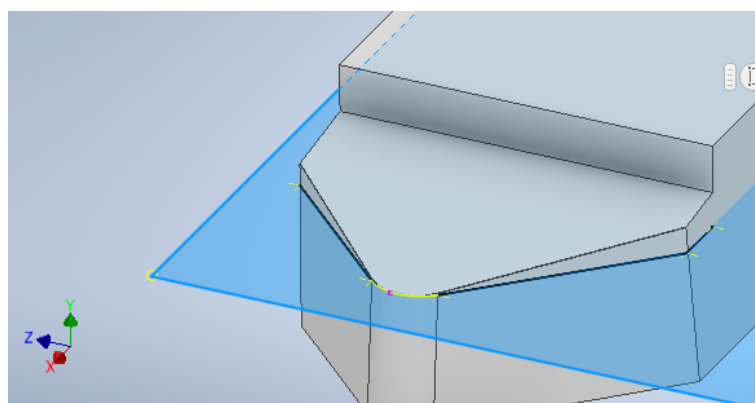


Figura 32 – Criação do Plano Auxiliar 1, ou Plano de Referência
Fonte: O Autor

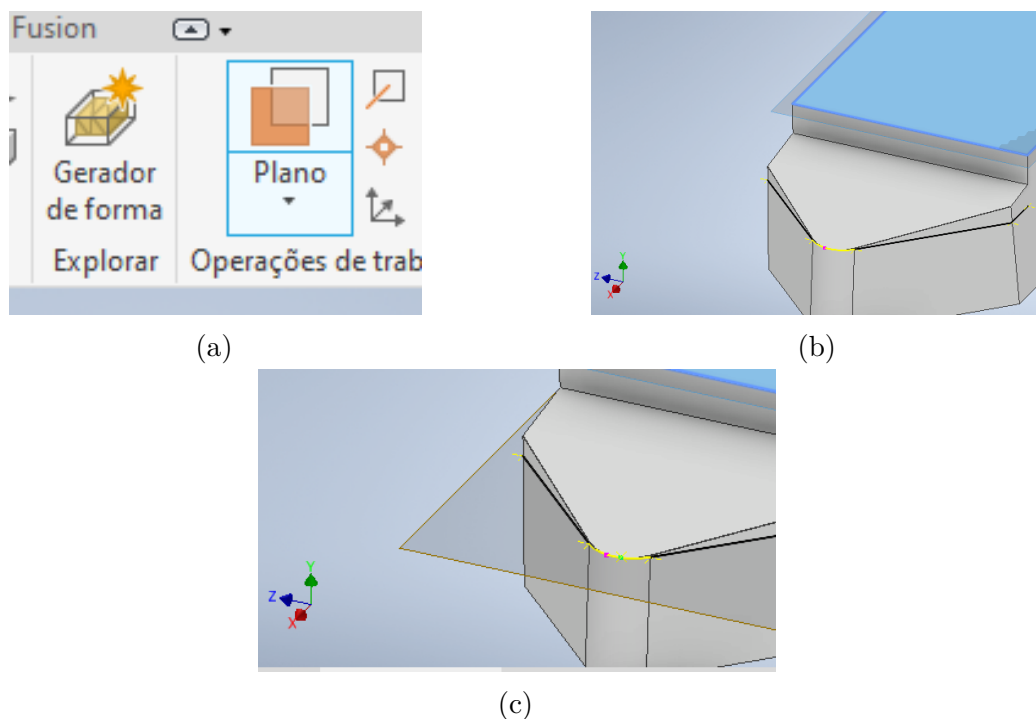


Figura 33 – Passo a passo para criação do Plano Auxiliar1 ou Plano de Referência: Localização da ferramenta "Plano"(a); Seleção do topo da ferramenta (b); Seleção da curva da ponta da ferramenta, criada no Esboço 9 (c)

Finalizado o Plano Auxiliar 1 ou Plano de Referência, é necessário criar o Plano Auxiliar 2, que é paralelo ao plano XY e passa pela ponta da ferramenta, conhecido na usinagem por Plano Dorsal. Isso pode ser realizado com a mesma ferramenta utilizada anteriormente, entretanto, dessa vez, selecionando-se a lateral da ferramenta e o ponto criado na ponta da ferramenta, no Esboço 9. O resultado é mostrado na Figura 34.

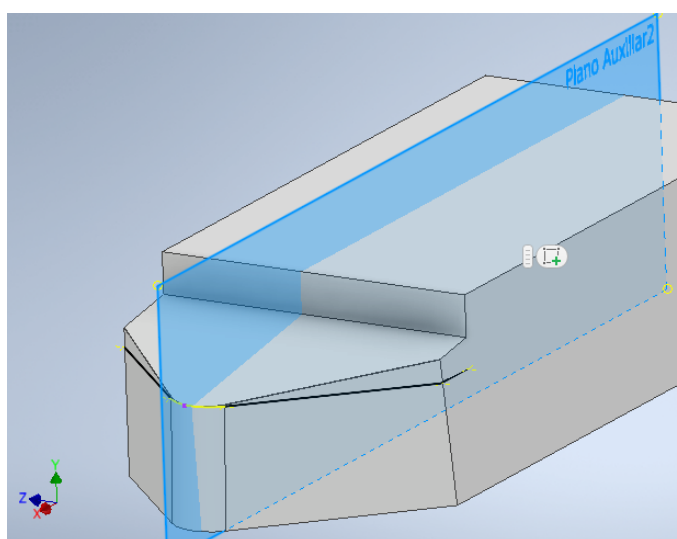


Figura 34 – Criação do primeiro Plano Auxiliar 2, ou Plano Dorsal
Fonte: O Autor

Da mesma maneira que feito anteriormente, é importante renomear o plano para

Plano Auxiliar 2. Ainda fazendo uso da ferramenta “Plano”, deve-se criar o Plano Auxiliar 3, que é conhecido na usinagem como Plano de Trabalho. Essa operação pode ser realizada de forma análoga às duas operações anteriores, mas, dessa vez, utilizando a superfície que aparece em azul na Figura 35. Clicando-se nessa superfície, o *software* entende que se deseja criar um plano paralelo ao da superfície. Feito isso, basta clicar no ponto do Esboço 9 que foi colocado na ponta da ferramenta e o *software* entenderá que o plano deve passar por esse ponto. Assim, conclui-se o Plano Auxiliar3.

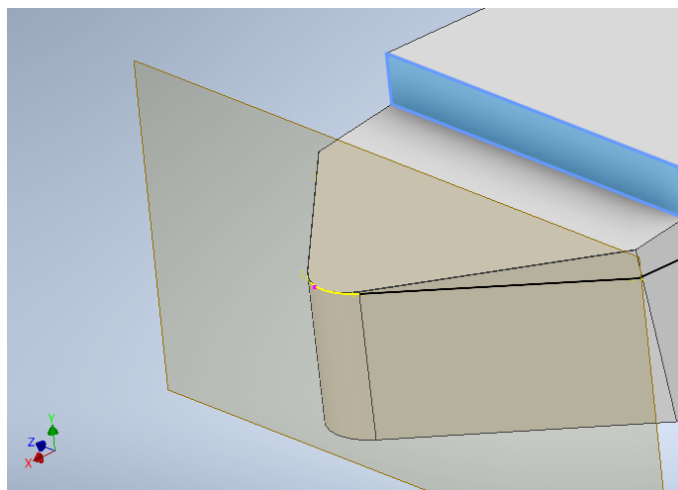


Figura 35 – Criação do primeiro Plano Auxiliar3, ou Plano de Trabalho
Fonte: O Autor

3.2 CRIAÇÃO DO MODELO DO TARUGO

3.2.1 Exportação e derivação do Esboço 9

O primeiro passo para desenvolver o modelo do tarugo é criar um arquivo de extensão ipt, assim como foi feito na criação do modelo da ferramenta. Depois, deve-se abrir o arquivo Modelo-Ferramenta, selecionar o Esboço 9 na árvore de comando e ativar a opção “exportar objeto” (Figura 36).

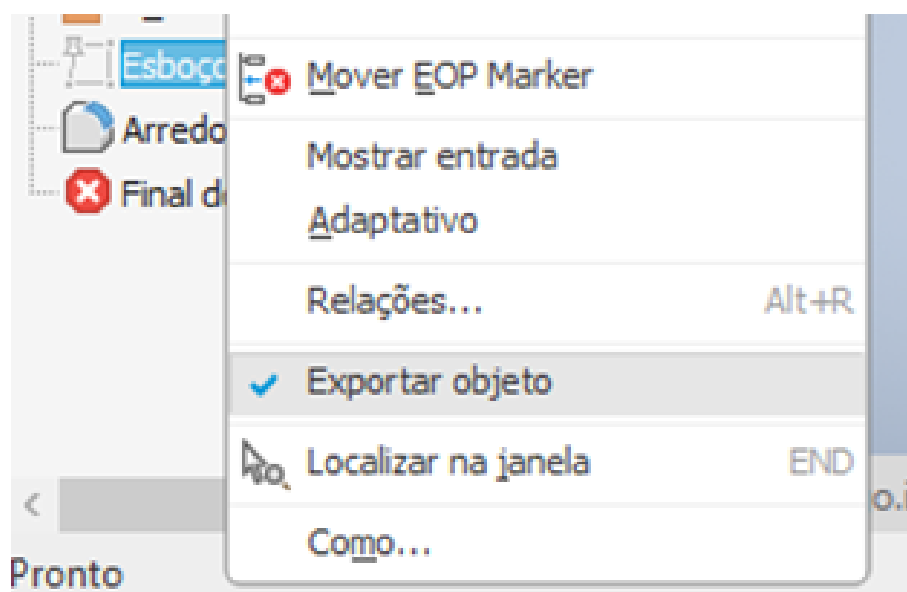


Figura 36 – Ativação da opção “Exportar objeto” sobre o Esboço 9
Fonte: O Autor

Depois, já no arquivo Tarugo, deve-se acessar a opção “Derivar”, localizada na aba “Administrar” (Figura 37), é preciso selecionar o arquivo Modelo-Ferramenta.ipt, e o Esboço 9 (Figura 38).

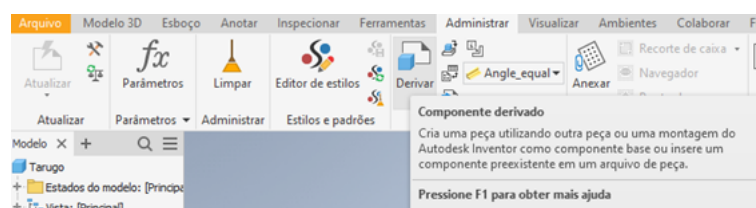


Figura 37 – Localização da ferramenta "Derivar" na aba "Administrar"
Fonte: O Autor

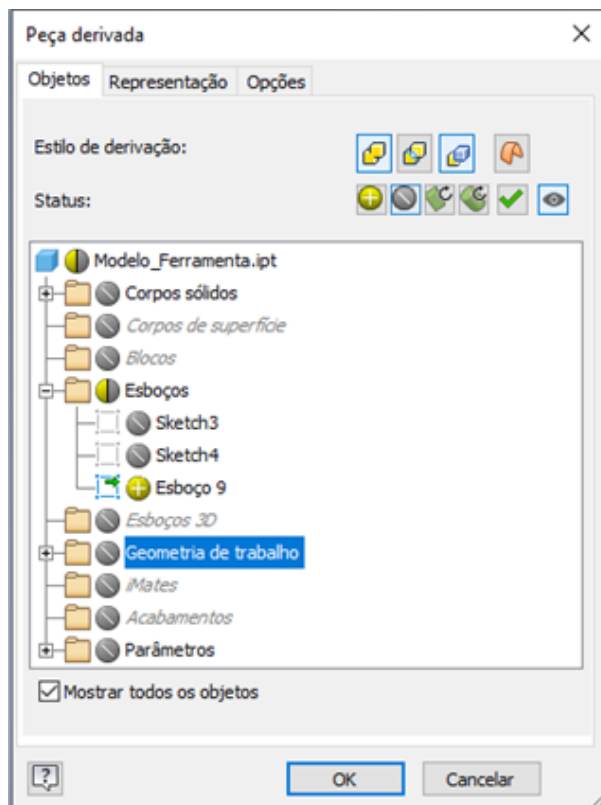


Figura 38 – Configuração da ferramenta "Derivar" na aba "Administrar": os círculos em amarelo estão selecionados, enquanto os cinzas não. O mesmo vale para os blocos em azul (selecionados) e cinzas (não selecionados) no canto direito superior

Fonte: O Autor

3.2.2 Modelagem do arquivo Tarugo.ipt

Posteriormente, com o Esboço 9 já importado, é necessário desenhar o perfil que será submetido ao processo de revolução para gerar o tarugo, como mostra a Figura 39.

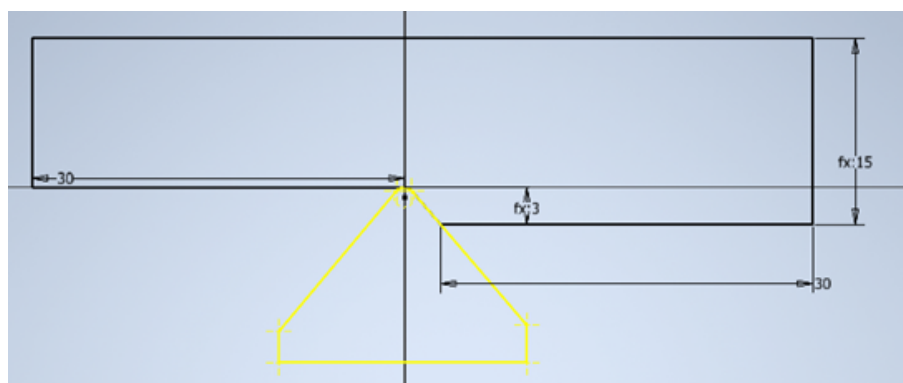


Figura 39 – Alterações no Esboço 9 e sua derivação do arquivo Modelo-Ferramenta.ipt para o arquivo Tarugo.ipt

Fonte: O Autor

Por fim, deve-se gerar o sólido por revolução, como mostra a Figura 40.

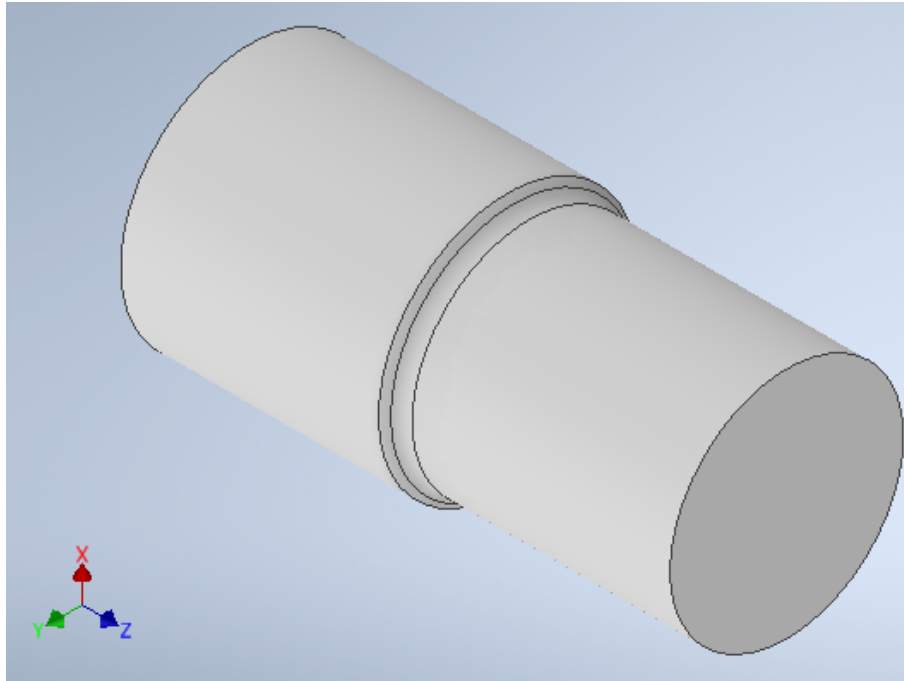


Figura 40 – Sólido Tarugo.ipt
Fonte: O Autor

Neste ponto, o sólido em si já está pronto. Entretanto, faz-se necessário criar três planos de referência, que serão indispensáveis para o posicionamento da ferramenta no arquivo Montagem.iam. Mas, antes de criar os planos, é necessário criar os Esboços 10 e 11, que fornecerão pontos para referenciar e posicionar os planos.

Iniciando pelo Esboço 10, que deve ser criado na face de maior diâmetro do tarugo, deve-se gerar dois círculos, e através as restrições do tipo "Cocêntrico" e "Tangente" (Figura 41), garantir que terão os mesmos diâmetros de ambas as faces do tarugo. Por fim, deve-se criar dois pontos diametralmente opostos em cada um dos círculos, como mostra a Figura 42.

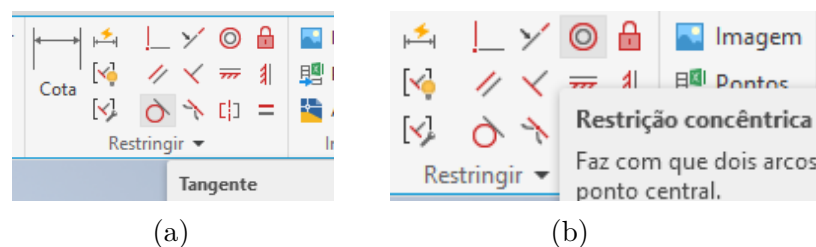


Figura 41 – Ferramenta "Tangente" (a); Ferramenta "Restrição Concêntrica" (b)

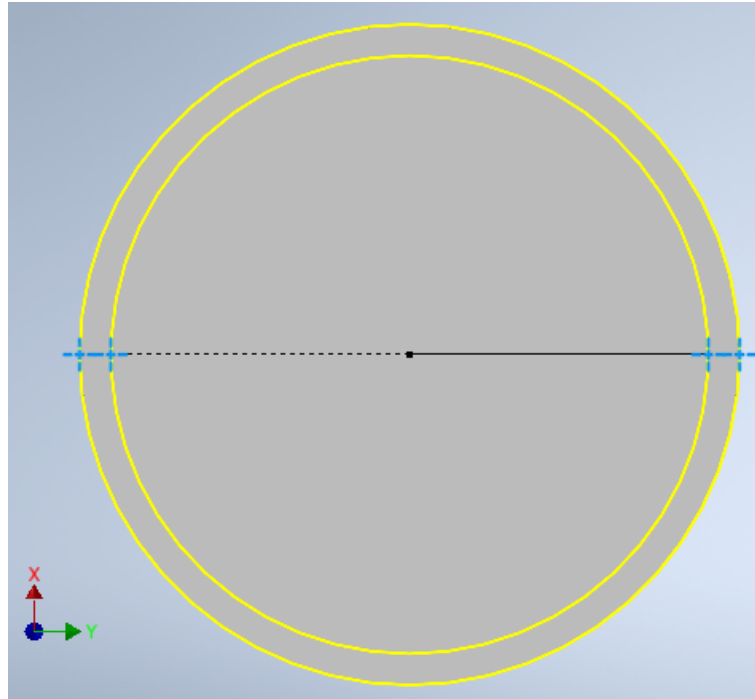


Figura 42 – Esboço 10 e seus quatro pontos auxiliares, destacados em azul
Fonte: O Autor

De forma análoga, deve-se criar o Esboço 11 posicionado na menor face do tarugo. Entretanto, é importante notar a presença de um quinto ponto, posicionado na linha vertical que passa pelo ponto posicionado no diâmetro interno, como mostra a Figura 43.

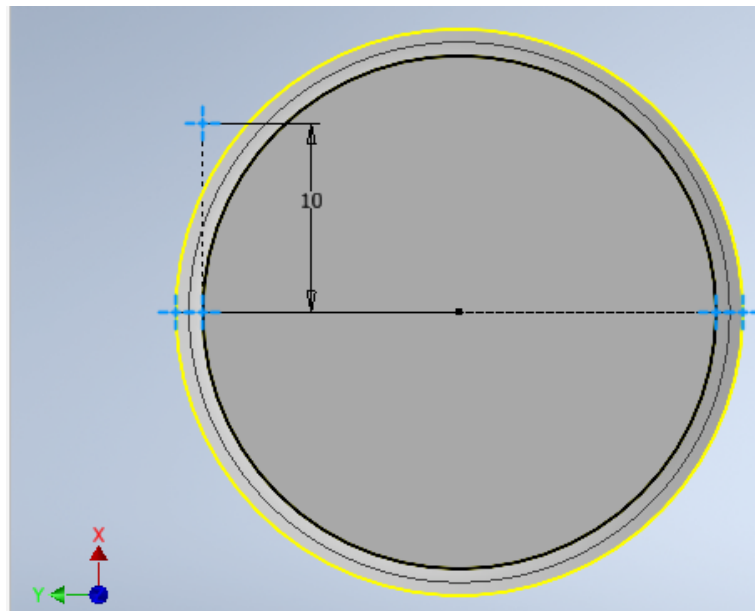


Figura 43 – Esboço 11 e seus cinco pontos auxiliares, destacados em azul
Fonte: O Autor

Finalmente, criados os Esboços 10 e 11, pode-se criar os três planos auxiliares do tarugo. Para tanto, deverão ser utilizadas as ferramentas "Três Pontos" para criação do Plano Auxiliar 4 (par do Plano de Referência) e do Plano Auxiliar 6 (par do Plano Dorsal),

e a ferramenta "Plano Médio do Toróide" para criação do Plano Auxiliar 5 (par do Plano de Trabalho), como mostra a Figura 44.

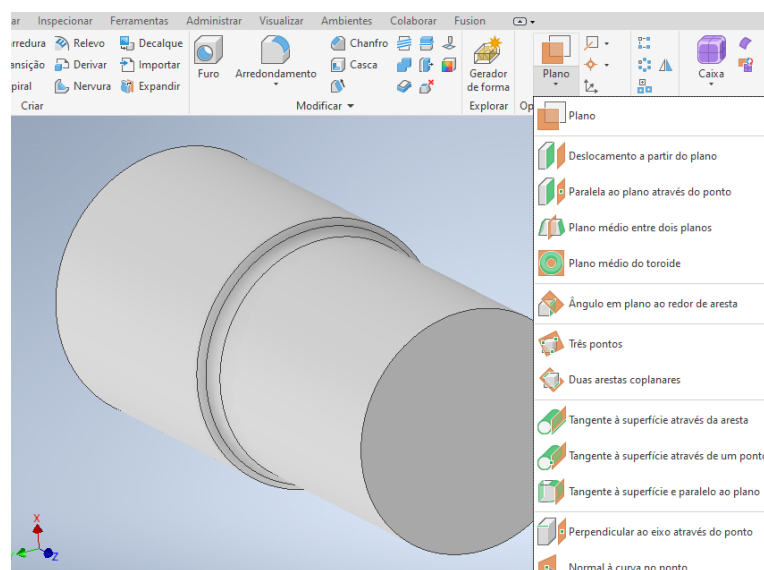


Figura 44 – Localização das ferramentas "Três Pontos" e "Plano Médio do Toróide" para criação dos planos auxiliares

Fonte: O Autor

Assim, pode-se criar os planos auxiliares, como mostra a Figura 45.

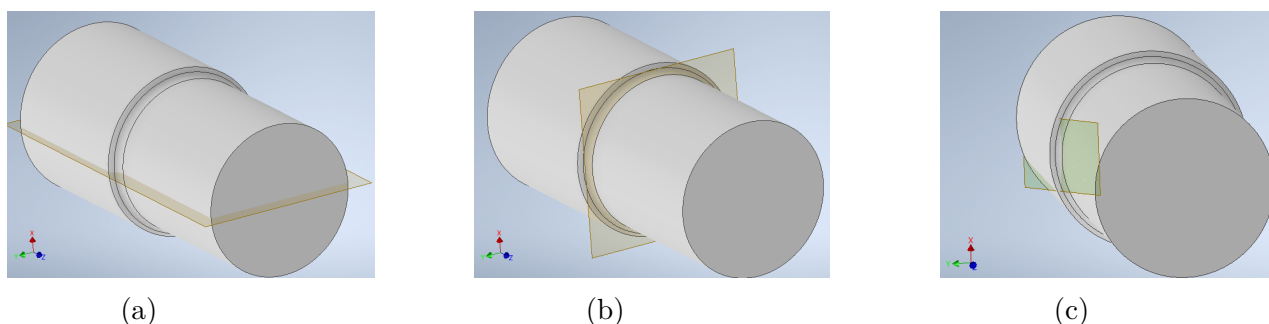


Figura 45 – Plano Auxiliar 4, par do Plano de Referência (a); Plano Auxiliar 5, par do Plano Dorsal (b); Plano Auxiliar 6, par do Plano de Trabalho (c);

É fundamental lembrar de renomeá-los para os nomes apresentados, a fim de manter-se a organização da árvore de comandos. Por fim, chega-se à configuração final do arquivo Tarugo.ipt

3.2.3 CRIAÇÃO DO MODELO DA MONTAGEM FERRAMENTA-CAVACO

Para realizar a montagem, deve-se primeiramente iniciar um arquivo do tipo "Montagem" e importar os arquivos Tarugo.ipt e Modelo-Ferramenta.ipt. Posteriormente, utilizando a ferramenta "Restringir", localizada na aba "Montagem", deve-se realizar restrições do tipo "Coincidente" (opção apresentada na caixa de parâmetros da ferramenta

"Restringir"), travando o Plano Auxiliar 1 com o Plano Auxiliar 4, o Plano Auxiliar 2 com o Plano Auxiliar 5 e o Plano Auxiliar 3 com o Plano Auxiliar 6.

Posteriormente, como realizado nos primeiros passos da criação do modelo da Ferramenta, deve-se criar um parâmetro chamado "avanco", que armazenará o valor do avanço.

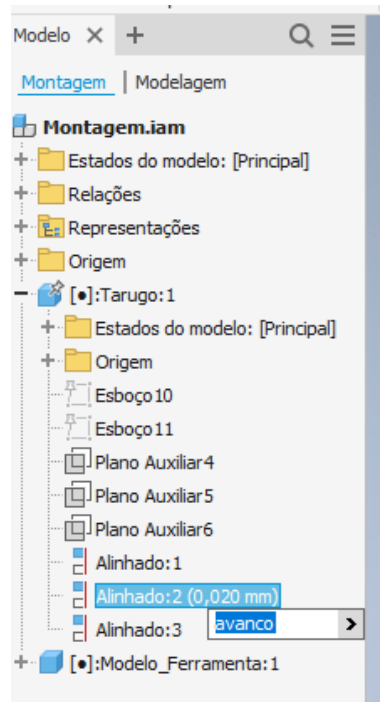


Figura 46 – Atribuição do "avanco" ao modelo
Fonte: O Autor

Essa ação deverá criar uma defasagem entre os Planos Auxiliares 2 e 5, que pode ser vista na Figura 47.

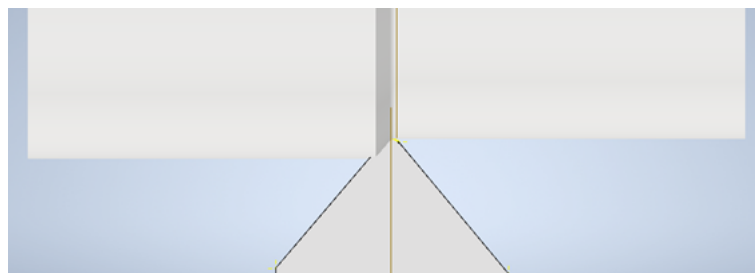


Figura 47 – Defasagem entre centro da ferramenta e ferramenta, representando o avanço por volta

Fonte: O Autor

Finalmente, deve-se obter o arquivo Montagem.iam finalizado, como mostra a Figura 48.

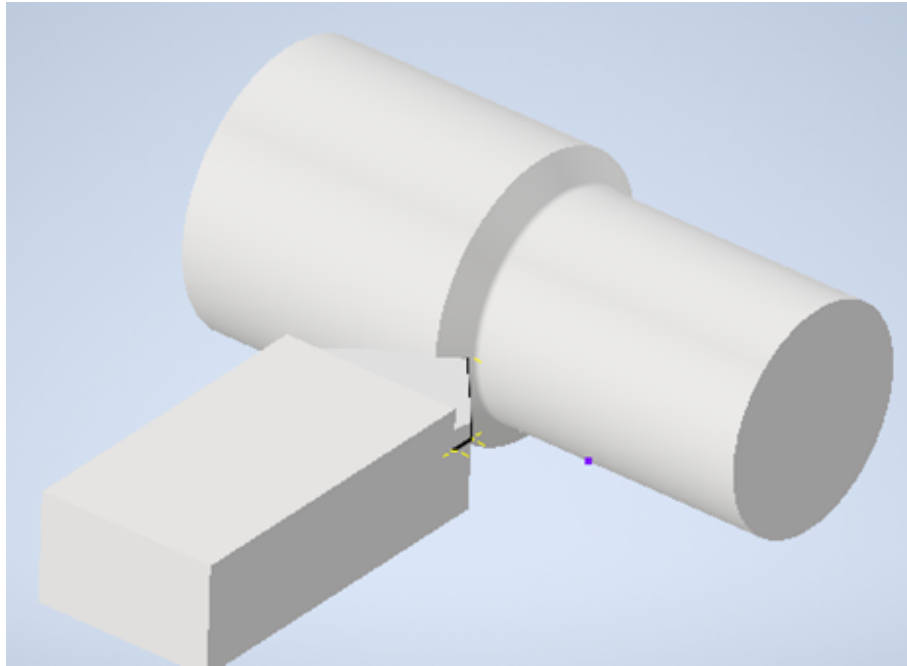


Figura 48 – Arquivo Montagem.iam finalizado
Fonte: O Autor

3.3 CRIAÇÃO DO CAVACO

Não é possível realizar operações booleanas em arquivos de montagem. Por essa razão, deve-se criar um novo arquivo de extensão ".ipt" proveniente da montagem, através da ferramenta "Montagem" > "Simplificação" > "Criar Peça Simplificada". O novo arquivo deve ser nomeado como Cavaco.ipt. Finalmente, deve-se utilizar a ferramenta "Combinar", localizada na aba "Modelo 3D" (Figura 49), selecionar os dois corpos e parametrizar a operação booleana do tipo "Intersecção". Assim, finalmente é obtido o modelo 3D do cavaco, como mostra a Figura 50.

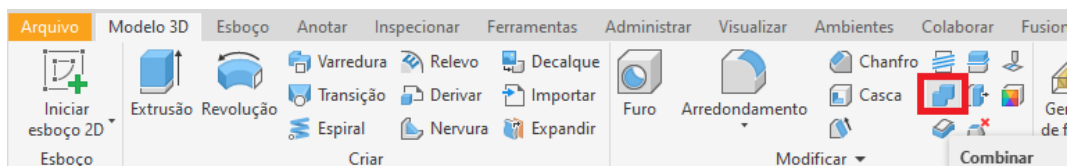


Figura 49 – Localização da ferramenta "Combinar"
Fonte: O Autor

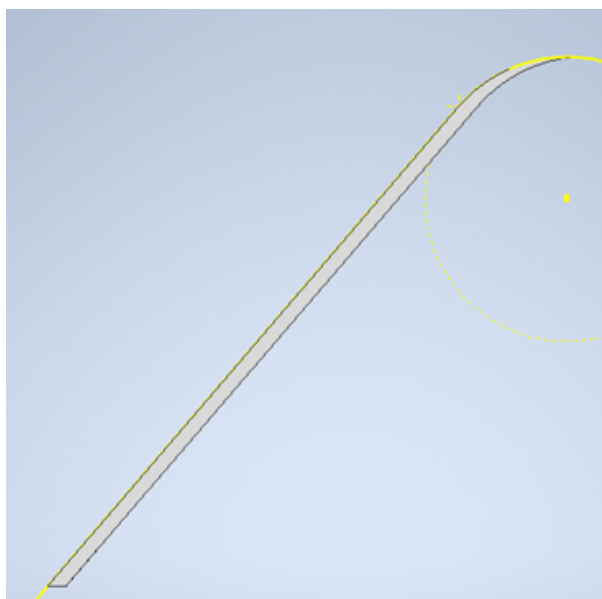


Figura 50 – Modelo 3D do cavaco
Fonte: O Autor

Posteriormente, é necessário realizar algumas operações para tornar a análise da geometria do cavaco mais fácil. Primeiro, é necessário criar um plano paralelo ao plano YZ e nomeá-lo Plano de Trabalho 7, como mostra a Figura 51.

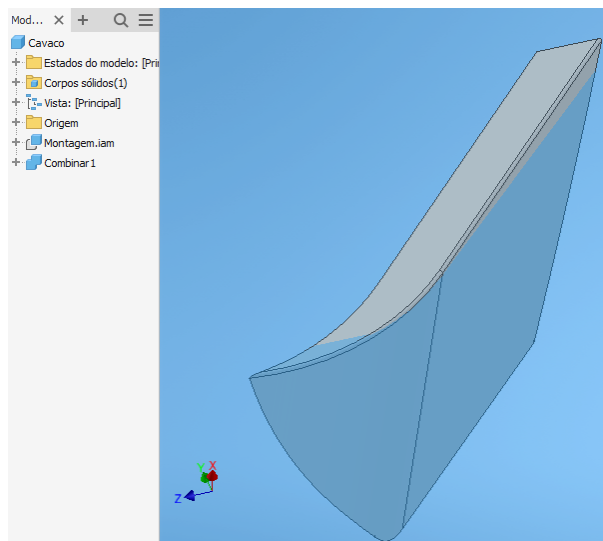


Figura 51 – Posicionamento do "Plano de Trabalho 7"
Fonte: O Autor

Depois, deve-se selecionar este plano e executar um esboço como mostrado na Figura 52. O esboço deve ser nomeado "Esboço 12".

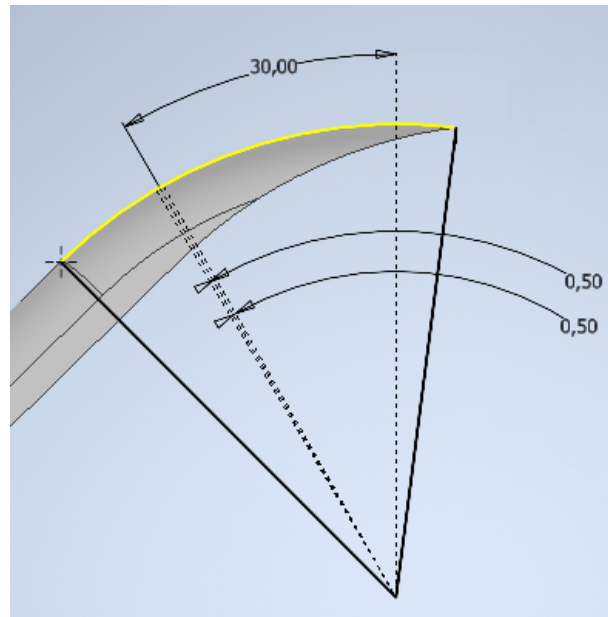


Figura 52 – "Esboço 12" e sua disposição sobre o cavaco
Fonte: O Autor

O ângulo de 30 graus mostrado compreende o arco existente entre o segmento de reta vertical à direita (o referencial zero, sempre fixo nessa posição) e um segundo segmento de reta, cuja posição será variada sempre que o ângulo for alterado. Em cada lado desse segmento de reta deve existir outro segmento, com ângulo fixo de 0,5 grau, como mostra a Figura 53. É importante notar que esses dois segmentos de reta serão responsáveis por definir o segmento de cavaco durante os experimentos.

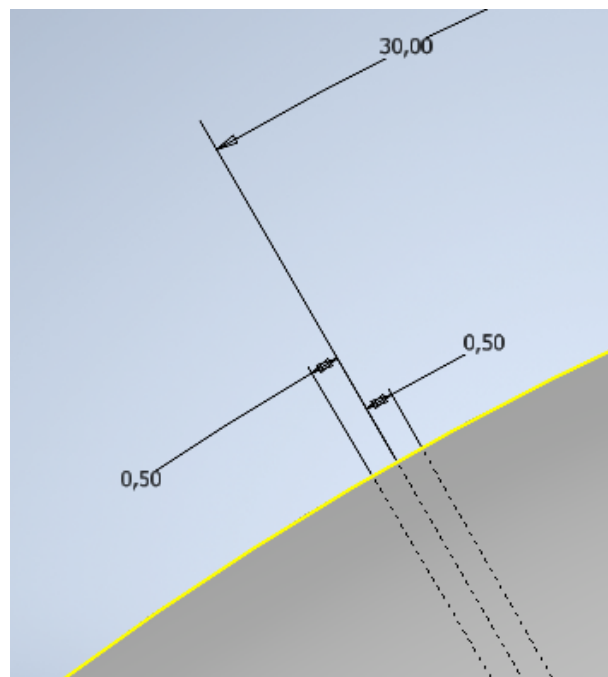


Figura 53 – Detalhe do "Esboço 12", focando nos segmentos de reta que definirão a secção do cavaco com abertura de 1 grau
Fonte: O Autor

Posteriormente, com a ferramenta "Ângulo em Plano Através da Aresta", deve-se criar os planos "Plano de Trabalho 8" e "Plano de Trabalho 9". Para isso, basta clicar no segmento de reta e depois clicar em "Plano de Trabalho 7", na árvore de comandos, e inserir um ângulo de 90 graus na caixa de entrada que aparecerá. O resultado é mostrado na Figura 54.

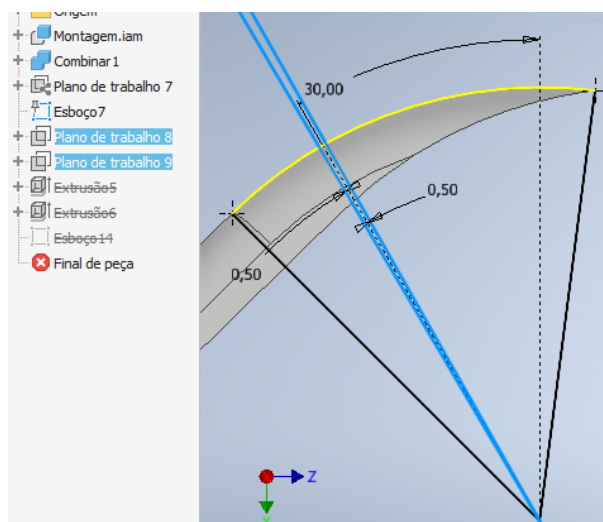


Figura 54 – Planos de Trabalho 8 e 9 sobre o modelo do cavaco
Fonte: O Autor

Após isso, deve-se selecionar cada um dos dois planos citados anteriormente e desenhar, em cada um deles, um quadrado grande o bastante para cobrir toda a ferramenta e posicionado ao centro do sistema cartesiano, como mostra a Figura 55. Estes esboços devem ser nomeados "Esboço 13" (no caso do "Plano de Trabalho 8") e "Esboço 14" (no caso do "Plano de Trabalho 9").

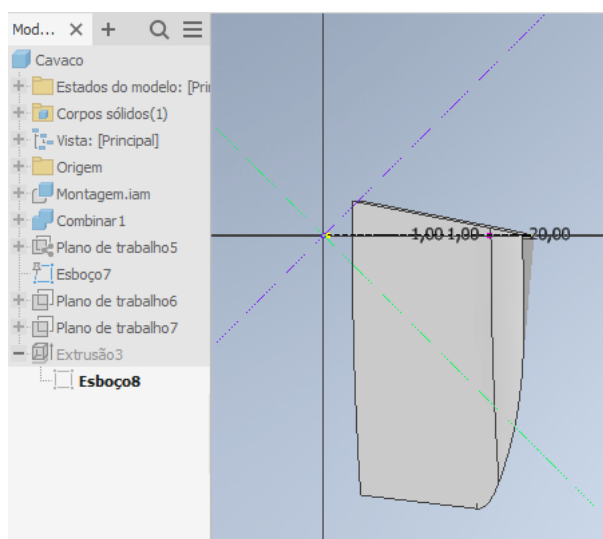


Figura 55 – Execução do "Esboço 13"
Fonte: O Autor

No passo seguinte, os esboços devem ser extrudados em direções opostas com a função booleana "recortar" selecionada, gerando o resultado mostrado na Figura 56.

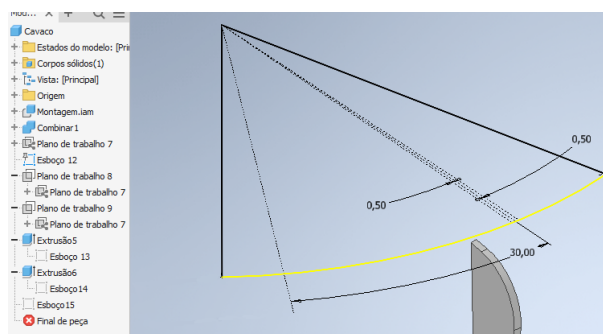


Figura 56 – Modelo do cavaco recortado em um arco de 1 grau
Fonte: O Autor

Finalmente o modelo tridimensional do cavaco está pronto para ter sua área de contato aferida. Para tanto, basta selecionar a ferramenta "Medir", disponível no menu "Inspeccionar", e clicar sobre a área que se deseja aferir. Clicando com o botão direito sobre o "Esboço 12" e selecionando a opção "Visibilidade", pode-se mantê-lo visível, tornando a alteração da cota do ângulo de posição fácil de ajustar. Caso deseje-se retornar ao cavaco inteiro, basta clicar com o botão direito do mouse sobre as operações de extrusão dos Esboços 13 e 14 e clicar na opção "suprimir operação".

Assim, chega-se a um modelo completamente dinâmico. Ao alterar qualquer parâmetro de qualquer um dos arquivos, basta clicar no ícone de atualizar, mostrado na Figura 57 e todo o cavaco será atualizado.

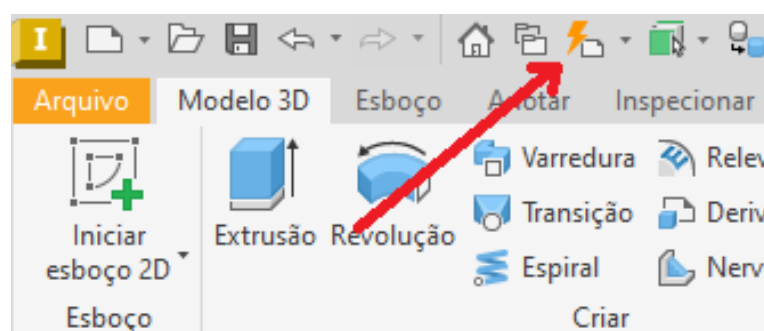


Figura 57 – Botão "atualizar modelo", normalmente cinza, ficará colorido toda vez que uma alteração tiver sido feita e o modelo dependente estiver desatualizado
Fonte: O Autor

3.4 PARÂMETROS FIXADOS

Os seguintes parâmetros foram fixados ao longo de todas as etapas deste trabalho, visto que não são tema principal do estudo:

- Ângulo de saída: $\gamma_o = -6^\circ$
- Ângulo de folga: $\alpha_o = 6^\circ$

- Ângulo de inclinação: $\lambda = -6^\circ$
- Ângulo de ponta: $r_\epsilon = 90^\circ$
- Ângulo de posição: $\kappa_r = 45^\circ$
- Profundidade de usinagem: $a_p = 2,0mm$

A escolha do valor da profundidade de usinagem se deve ao fato de que este é um valor suficientemente grande para que toda a região da ponta da ferramenta esteja totalmente inserida no tarugo, independente dos valores atribuídos às variáveis escolhidas. Caso a profundidade de usinagem fosse pequena demais, o cavaco poderia ser interrompido ainda em sua região curva, de forma que sua abertura total teria menos de 45° .

3.5 ANÁLISE DA ESPESSURA DE CORTE

O objetivo da análise de perfil do cavaco é verificar como sua espessura varia ao longo do comprimento de contato. Para tanto, é necessário criar um arquivo do tipo drawing (extensão .dwg) e selecionar a vista superior do cavaco, como mostra a Figura 58. É importante destacar que a espessura calculada (h) é diferente da espessura medida fisicamente com micrômetro (h'), como destaca Ferraresi (1977).

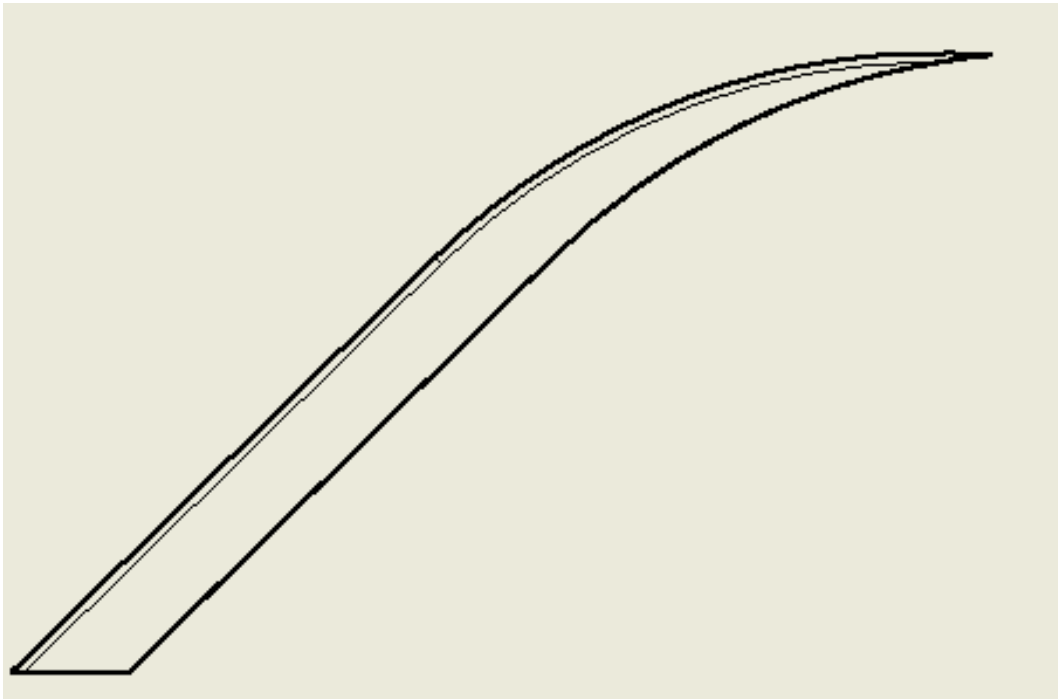


Figura 58 – Vista superior do cavaco, evidenciando seu perfil curvo
Fonte: O Autor

É fundamental que a vista seja inserida na folha em escala 1:1, pois as medidas de espessura serão realizadas por meio de um esboço auxiliar. Dessa forma, qualquer escala diferente gerará uma medida irreal.

Para realizar a medida da espessura, é necessário selecionar a "VISTA 1: Cavaco.ipt" na árvore de comandos (Figura 59a), e depois clicar em "Novo Esboço". O Esboço

gerado na árvore de comando deve ficar dentro da "VISTA 1: Cavaco.ipt", como mostra a Figura 59b.

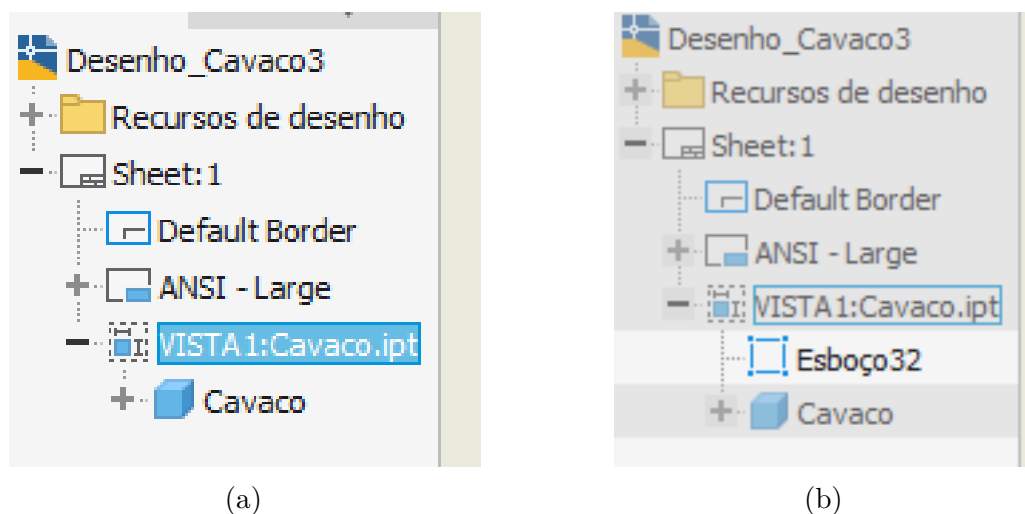


Figura 59 – Árvore de operações antes da criação do esboço (a); Arvore de operações depois da criação do esboço (b)

Depois, é necessário selecionar a ferramenta "Arco Centro" (Figura 60a), criar um arco solto em qualquer lugar na folha (Figura 60b), selecionar a ferramenta "Tangente" (Figura 61), clicar sobre o arco recém criado (Figura 62a) e depois sobre o arco externo do cavaco (Figura 62b). Por fim, deve-se selecionar a ferramenta "Restrição Coincidente" (Figura 63), clicar sobre o ponto que define a extremidade direita do arco criado (Figura 64a) e depois sobre a extremidade direita do arco externo do cavaco (Figura 64b). O mesmo deve ser feito para a extremidade esquerda. A criação e posicionamento deste arco podem a princípio parecer desnecessárias, entretanto são fundamentais para que centro do arco externo do cavaco se torne explícito e selecionável.

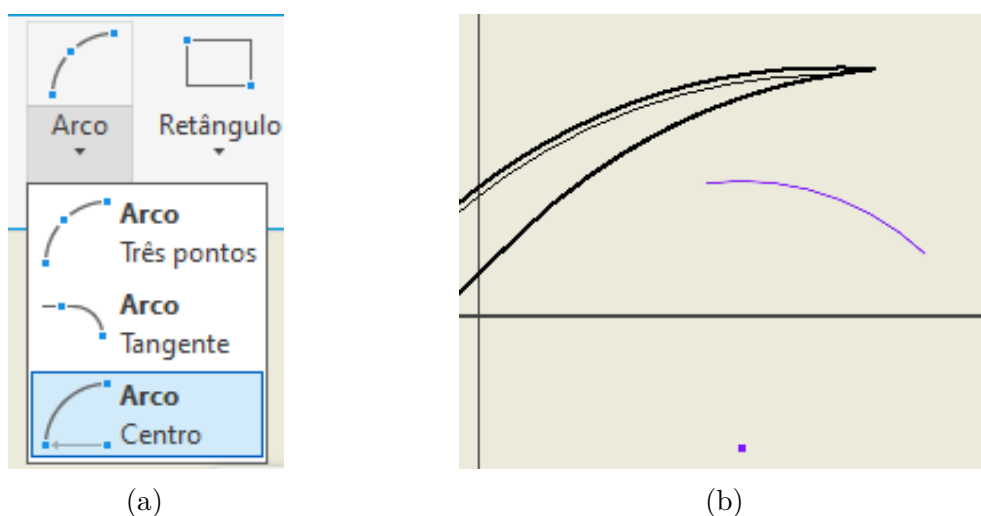


Figura 60 – Localização da ferramenta "arco centro"(a); Criação de um arco genérico (b)

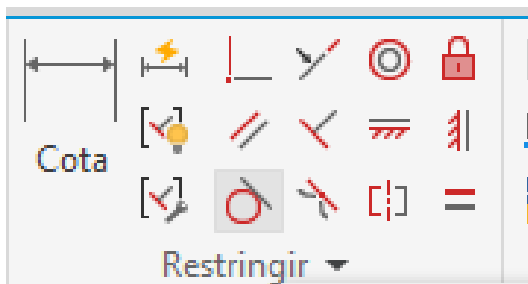


Figura 61 – Selecionando constrição tangente no menu
 Fonte: O Autor

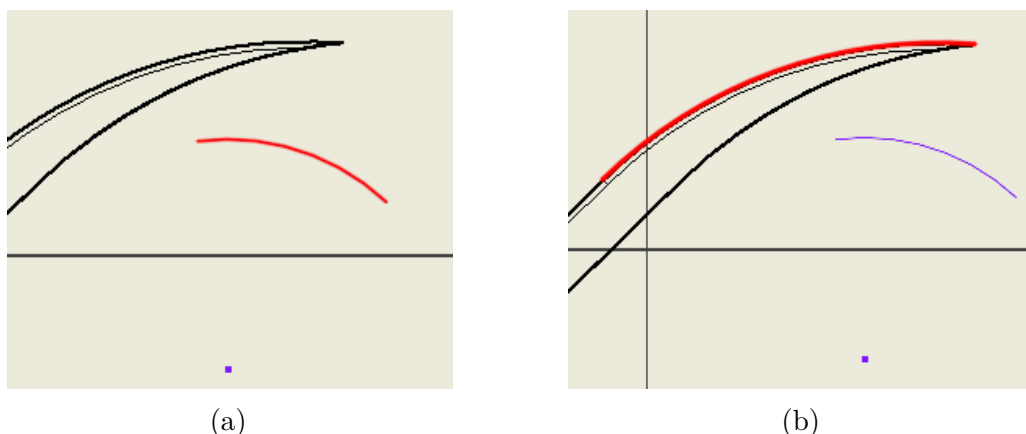


Figura 62 – Clicando sobre o arco recém criado (a); Clicando sobre o arco que descreve a região externa do cavaco (b)

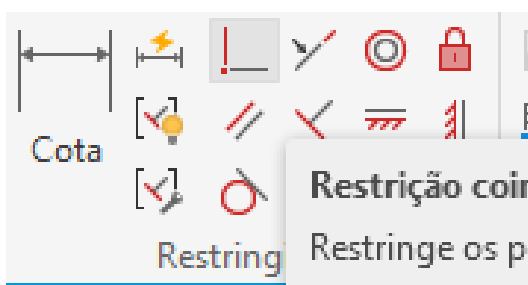


Figura 63 – Selecionando a ferramenta "Restrição Coincidente"
 Fonte: O Autor

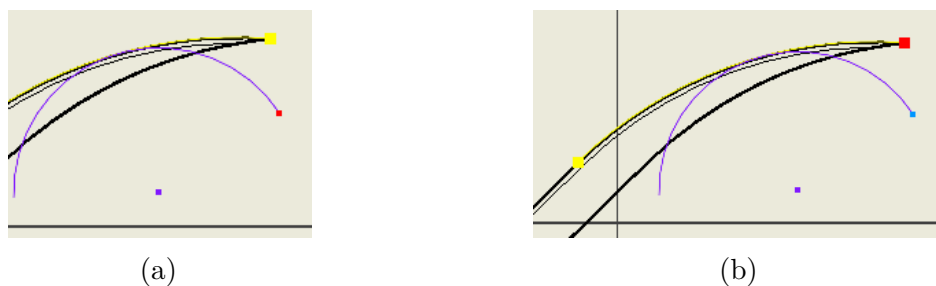


Figura 64 – Clicando sobre a extremidade direita do arco criado (a); Clicando sobre a extremidade direita do arco externo do cavaco (b)

Por fim, deve-se criar uma linha genérica sobre o desenho (Figura 65a) e depois, utilizando a ferramenta "Restrição Coincidente" (Figura 63), posicioná-la de modo que se conecte à extremidade direita do arco externo do cavaco e ao seu centro (Figura 65b). Por fim, deve-se repetir o mesmo procedimento para a extremidade esquerda do arco (Figura 65c).

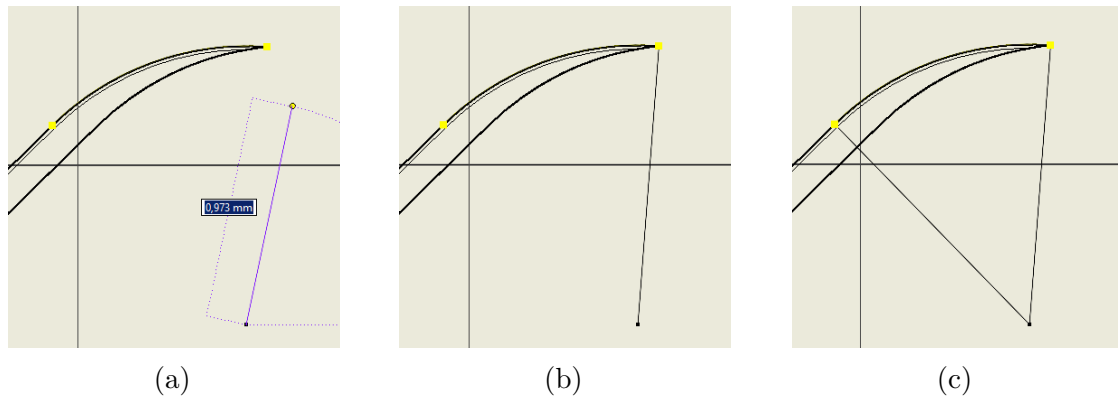


Figura 65 – Criando uma linha genericamente posicionada sobre o desenho (a); Com a ferramenta "Restrição Coincidente", posicioná-la de modo a ligar a extremidade esquerda do arco criado ao centro do arco (b); Repetindo o mesmo procedimento para a extremidade direita do arco (c)

A seguir, deve-se criar 7 segmentos de reta genericamente posicionados dentro do arco, como mostra a Figura 66a, e com a ferramenta "Cota", deve-se restringir o ângulo entre os segmentos de arco criados com valor igual a um oitavo do ângulo do arco maior, utilizando tantas casas decimais quanto for possível (Figura 66b).

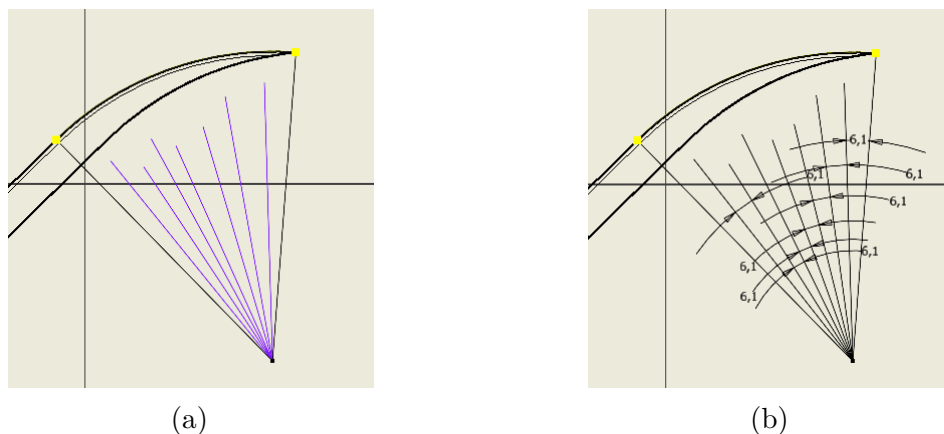


Figura 66 – Criando 7 segmentos de reta e posicionando-os genericamente dentro do arco principal (a); Definindo o ângulo de abertura dos arcos menores como $1/8$ do arco principal (b)

Na sequência, com a ferramenta "Restrição Coincidente" selecionada (Figura 63), deve-se clicar sobre a extremidade dos segmentos de reta dos arcos menores (ponto em vermelho na Figura 67a) e sobre o arco externo do cavaco (Figura 67b). O procedimento

deve ser realizado para todos os segmentos de reta, até atingir o resultado mostrado na Figura 67c.

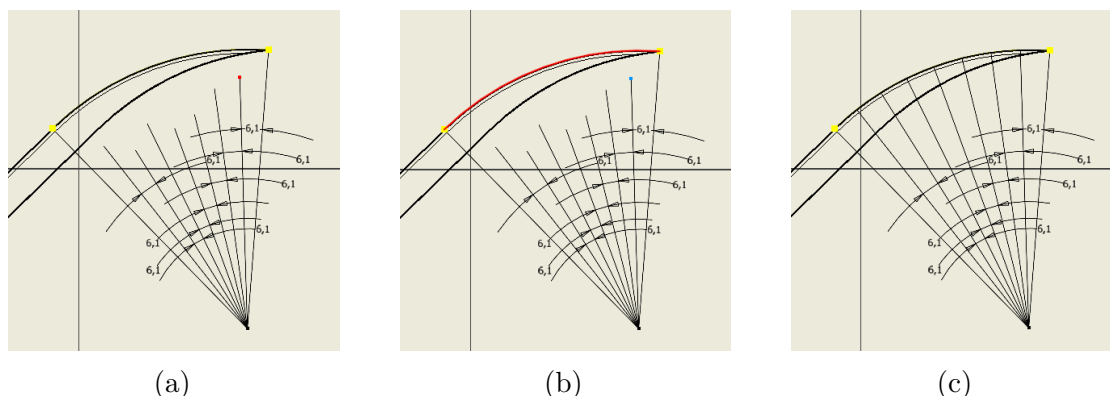


Figura 67 – Selecionando a extremidade dos segmentos de reta (a); Selecionando o arco externo do cavaco (b); Resultado final após posicionar todos os segmentos de reta (c);

Depois, utilizando-se a ferramenta "Ponto" (Figura 68a), deve-se criar um ponto dentro do cavaco, genericamente posicionado sobre o segmento de reta (Figura 68b), e com a ferramenta "Restrição Coincidente" selecionada (Figura 63), deve-se clicar sobre o ponto recém criado e na curva que delimita a vista do cavaco à direita (Figura 68c).

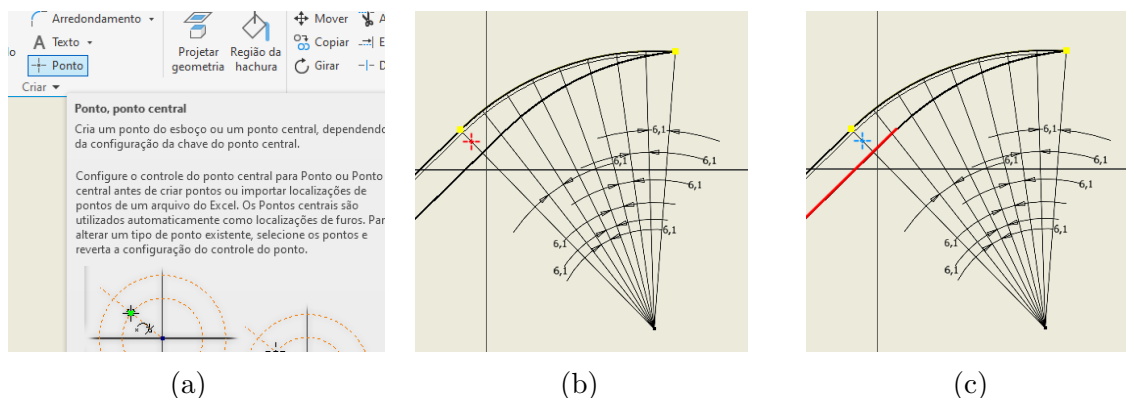


Figura 68 – Selecionando a ferramenta "Ponto" (a); Posicionando o ponto genericamente sobre um dos segmentos de reta (b); Selecionando a intersecção do segmento de reta com o cavaco (c);

Neste processo, é fundamental observar que existem duas curvas representadas na vista superior do cavaco, e deve-se garantir que o ponto fique sobre a mais interna delas (Figura 69), visto que a mais externa representa uma aresta nas regiões inferiores do cavaco.



Figura 69 – Vista ampliada das curvas que delimitam o cavaco à direita, com ênfase na curva interna

Fonte: O Autor

Após o processo ser repetido para todos os segmentos de reta, o esboço para medição da espessura de corte apresentará o aspecto mostrado na Figura 70.

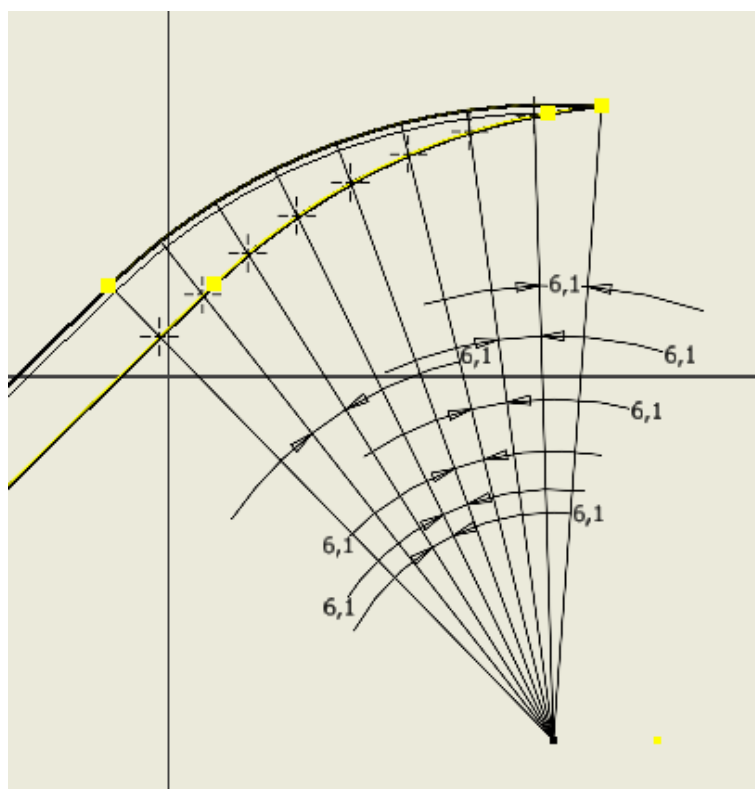


Figura 70 – Esboço criado para medição do cavaco
Fonte: O Autor

Por fim, um segmento de reta vertical e conectado ao centro do arco deve ser criado. Este segmento de reta representa o referencial das posições angulares, de forma que qualquer posição angular à sua direita é representada com valor negativo, enquanto à sua esquerda, qualquer posição angular é representada com valores positivos, como mostra a Figura 71.

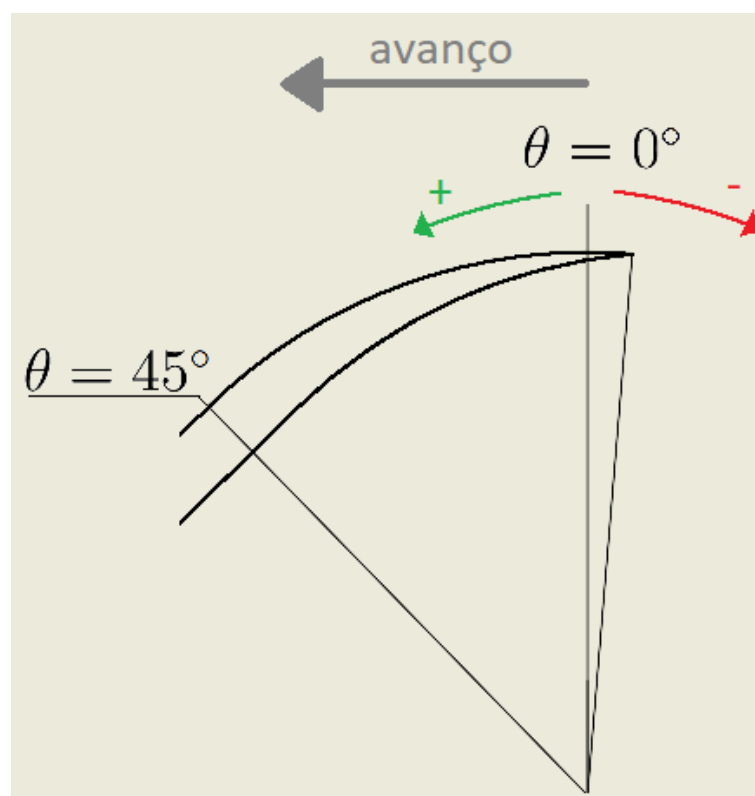


Figura 71 – Sistema referencial utilizado nos experimentos
Fonte: O Autor

É importante observar que esse sistema de referência em relação à posição angular foi criado com o intuito de simplificar as análises, mas poderia ter sido substituído pela profundidade de corte às custas de pouca complexidade adicionada à análise. A profundidade de usinagem dita onde o cavaco vai "acabar", e aumentar a profundidade faz com que o "fim" do cavaco vá se deslocando positivamente sobre o referencial da posição angular, criado aqui.

Infelizmente este esboço não é totalmente responsivo à alteração dos parâmetros, ao contrário dos modelos das demais seções. Toda vez que algum parâmetro for alterado e o modelo for atualizado (Figura 57), a representação 2D do cavaco vai mudar, e na maioria das vezes o esboço descrito nesta seção não poderá ser gerado automaticamente novamente, tendo de ser parcialmente refeito. O problema quase sempre está nos 7 segmentos de reta criados dentro do cavaco e em seus pontos. Dessa forma, caso o *software* informe falha ao executar o esboço, os passos descritos até (e inclusive) a Figura 66 podem ser poupados, mas os elementos criados após este ponto devem ser excluídos. Dessa forma, o *software* deve conseguir atualizar o modelo.

Finalmente, a parte analítica consiste em selecionar a ferramenta "Medir" e verificar a espessura de corte para cada um dos pontos criados, tabelando-as em função da posição angular. Quanto aos parâmetros utilizados, o raio de ponta foi variado entre os seguintes valores: $r_c = 0,2 \text{ mm}$, $r_c = 0,4 \text{ mm}$, $r_c = 0,8 \text{ mm}$, e $r_c = 1,2 \text{ mm}$.

Já o avanço foi variado entre os seguintes valores: $f = 0,02 \text{ mm/volta}$, $f = 0,04 \text{ mm/volta}$, $f = 0,06 \text{ mm/volta}$, $f = 0,08 \text{ mm/volta}$, $f = 0,10 \text{ mm/volta}$, $f = 0,12 \text{ mm/volta}$, $f = 0,14 \text{ mm/volta}$, $f = 0,16 \text{ mm/volta}$, $f = 0,18 \text{ mm/volta}$ e $f = 0,20 \text{ mm/volta}$. Dessa forma, com 4 condições de r_c e 10 condições de f , um total de 40 condições foram verificadas nessa etapa.

3.6 OBTENÇÃO DA PRESSÃO ESPECÍFICA PARA DIFERENTES MATERIAIS

Após avaliados os resultados do experimento descrito anteriormente, foram calculados valores da constante específica do metal k_s através da expressão de Kienzle (1952, **apud Ferraresi, 1977**), já apresentada na Equação 2. O processo foi desenvolvido da seguinte forma:

1. **Seleção dos Dados:** Com base nos resultados da análise anterior, foram selecionados os valores de espessura de corte correspondentes a uma condição específica de usinagem, sendo o raio de ponta de 0,8 mm e avanço de 0,10 mm/volta.
2. **Aplicação da Expressão de Kienzle:** A pressão específica k_s foi calculada utilizando a Expressão de Kienzle, apresentada na Equação 2, sendo h a espessura de corte. Os valores de k_{s1} e z foram obtidos a partir de dados apresentados por Ferraresi (1977). Para cada material considerado (CK45, GG26 e 34CrMo4), os valores de k_s foram calculados em função da espessura de corte obtida ao longo do comprimento de contato ferramenta-cavaco.
3. **Análise Comparativa:** Os resultados do cálculo de k_s foram organizados e comparados entre os diferentes materiais. Essa comparação possibilita a identificação de tendências e comportamentos específicos de cada material em relação à formação do cavaco e à resistência ao corte.

3.7 OBTENÇÃO DA ÁREA DA SUPERFÍCIE DE CONTATO FERRAMENTA-CAVACO

A análise da área de contato ferramenta-cavaco ao longo do raio de ponta foi obtida em duas etapas, de modo a se avaliar a área relacionada ao raio de aresta e a área relacionada à parte plana do contato. Inicialmente, utilizando a ferramenta "inspecionar", basta clicar sobre a região curva do cavaco, dada pelo raio de aresta da ferramenta, como mostra a Figura 72. Posteriormente, deve-se realizar o mesmo procedimento com a superfície plana da ferramenta, como mostra a Figura 73.

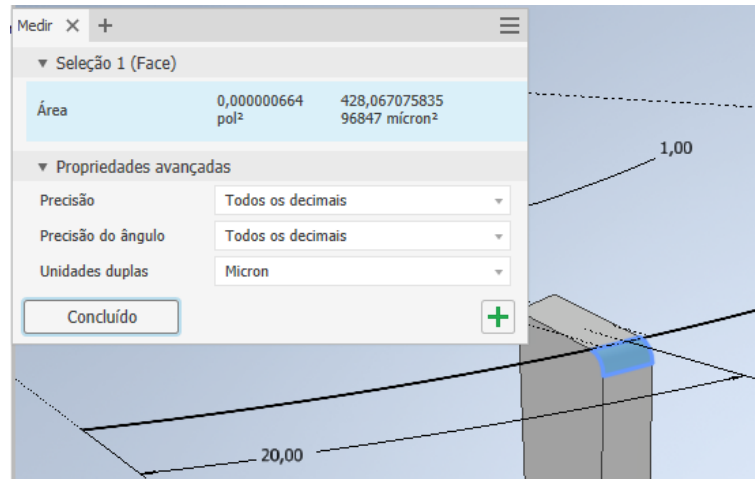


Figura 72 – Medição da superfície curva do segmento do cavaco
 Fonte: O Autor

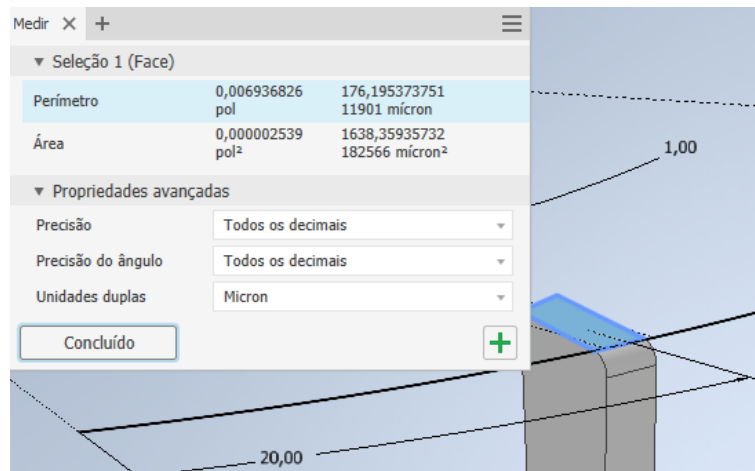


Figura 73 – Medição da superfície plana do segmento do cavaco
 Fonte: O Autor

Os dois valores devem ser transferidos para uma planilha Excel e associados ao ângulo correspondente (20 graus, no caso das Figuras 72 e 73). Por fim, basta alterar o valor da cota, atualizar o desenho e repetir o procedimento para o próximo segmento do cavaco, até que o cavaco seja mapeado ao longo de todo o comprimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE DA ESPESSURA DE CORTE

Antes de verificar os resultados, é importante observar que todos os gráficos deste ponto em diante são apresentados com o eixo das abscissas invertido (ou seja, crescendo da direita para a esquerda). Apesar de não usual, adotou-se essa forma de apresentação para que a visualização do gráfico seja condizente com o referencial adotado (Figura 71).

O gráfico da Figura 74 mostra o comportamento da espessura de corte para diferentes raios de ponta com a condição de avanço $f = 0,2$ mm/volta. Em todas as condições a seguir, a profundidade de usinagem é fixada em $a_p = 2,0$ mm.

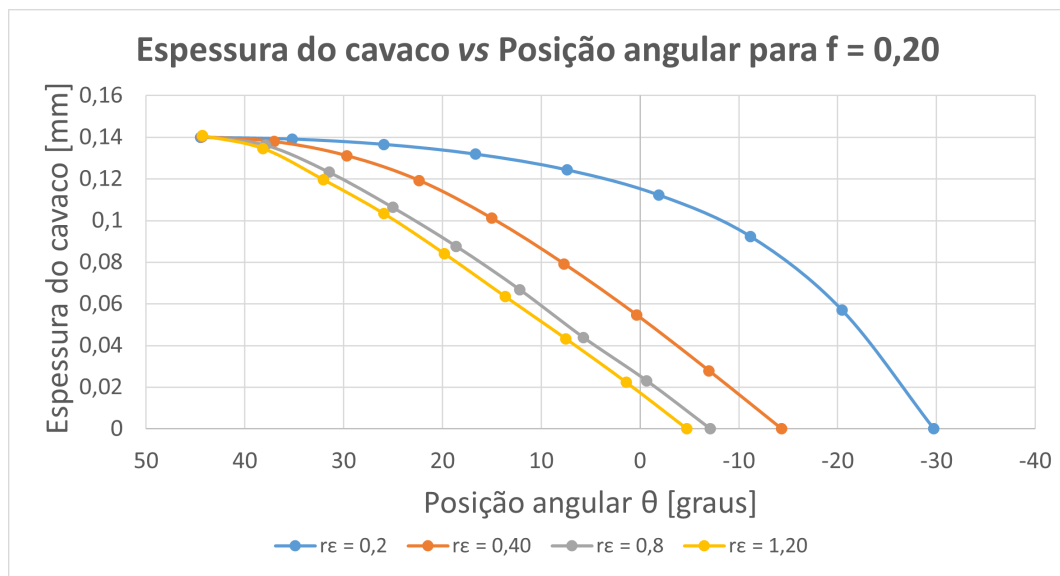


Figura 74 – Variação da espessura de corte para $f = 0,2$ mm/volta e diferentes raios de ponta

Fonte: O Autor

O gráfico da Figura 74 é melhor compreendido quando analisado em conjunto com a Figura 75, que mostra imagens dos cavacos nas quatro situações apresentadas.

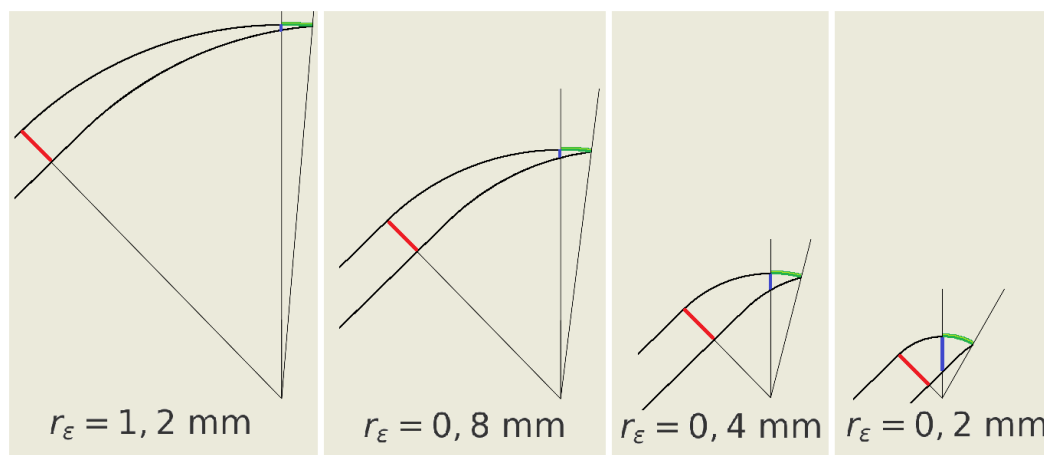


Figura 75 – Perfis dos cavacos para $f = 0,2$ mm/volta e diferentes raios de ponta
Fonte: O Autor

Três aspectos podem ser destacados com a análise das Figuras 74 e 75: (i) a maior espessura de corte ocorre em $\theta = 45^\circ$ e é igual para todas as condições, indicando que o raio de ponta não interfere mais, já que, a partir desta posição, a aresta reta passa a ter contato com o material. Na Figura 75, essa espessura é representada pelo segmento de reta em vermelho; (ii) a espessura de corte em $\theta = 0^\circ$ aumenta com a diminuição do raio de ponta, como se pode observar pelos segmentos de retas azuis na Figura 75; (iii) a formação do cavaco se inicia em posições angulares negativas, e sua posição angular inicial será mais negativa quanto menor for o raio de ponta. Diretamente relacionado ao corte na aresta secundária, esta característica pode ser geometricamente observada através dos arcos verdes da Figura 75.

Os gráficos das Figuras 76 a 79 mostram a espessura de corte em função da posição angular para diferentes valores de avanços e para raios de ponta com valores $r_\epsilon = 0,2$ mm, $r_\epsilon = 0,4$ mm, $r_\epsilon = 0,8$ mm e $r_\epsilon = 1,2$ mm, respectivamente.

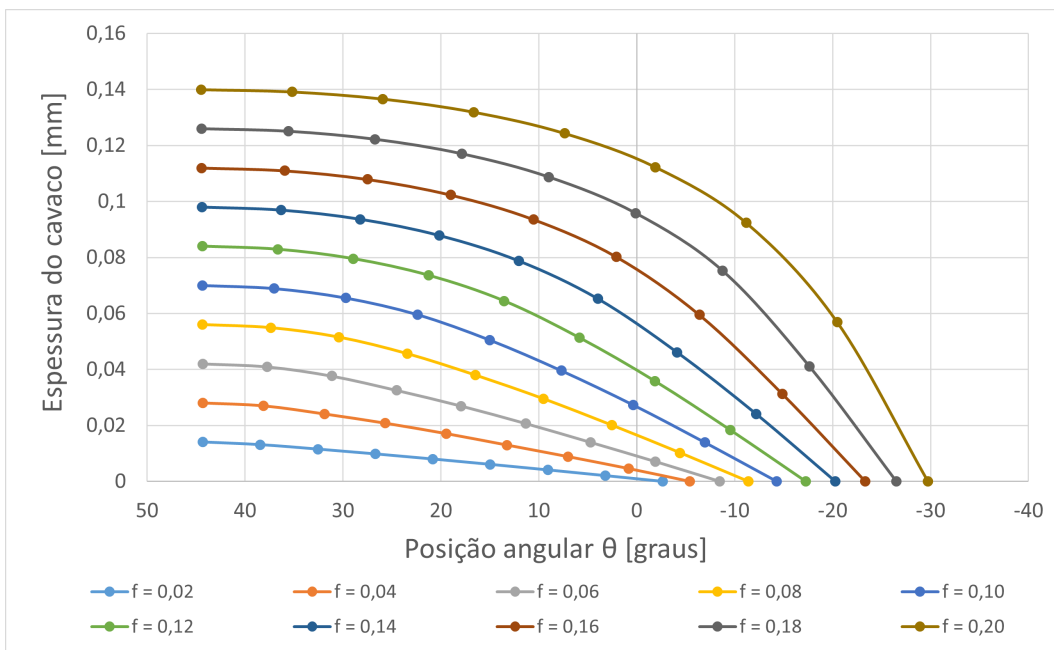


Figura 76 – Variação da espessura de corte ao longo da posição angular para diferentes avanços e $r_\epsilon = 0,2$ mm.

Fonte: O Autor

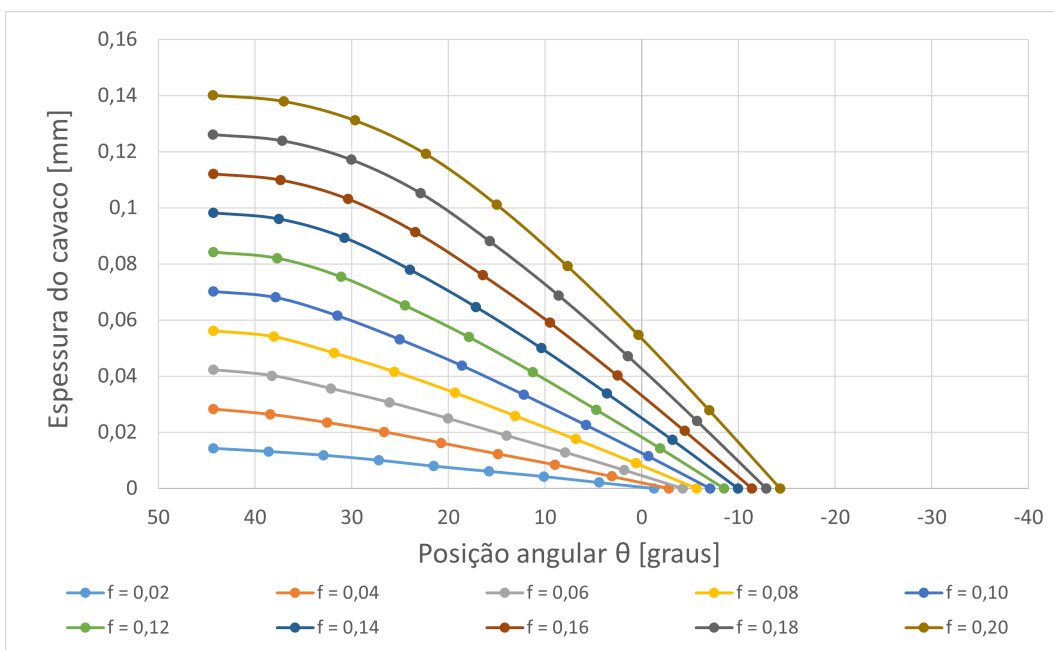


Figura 77 – Variação da espessura de corte ao longo da posição angular para diferentes avanços e $r_\epsilon = 0,4$ mm.

Fonte: O Autor

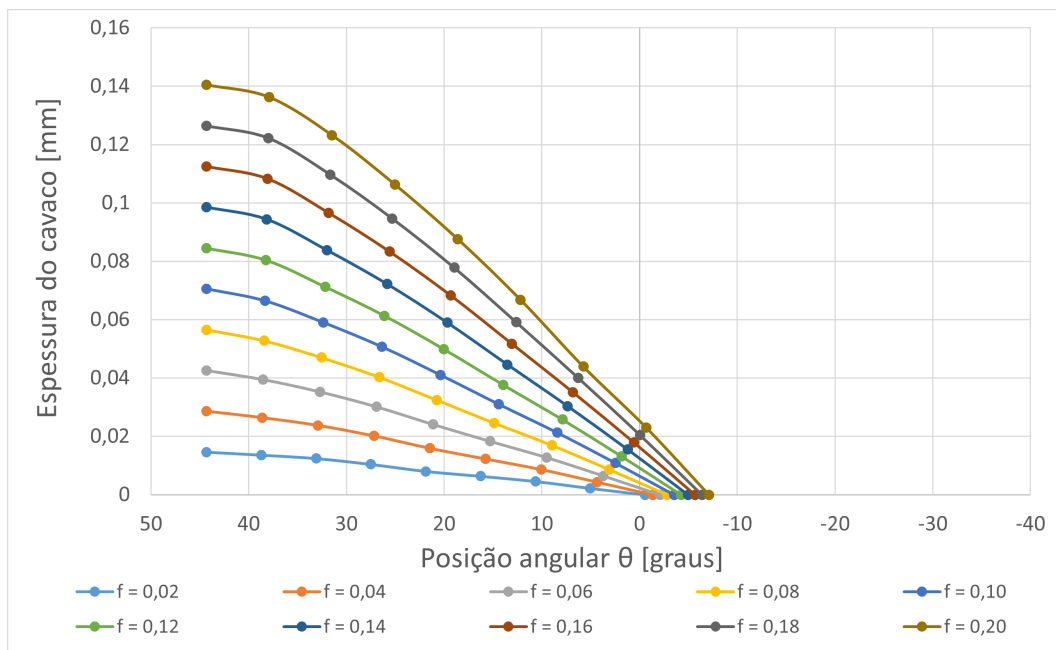


Figura 78 – Variação da espessura de corte ao longo da posição angular para diferentes avanços e $r_{\epsilon} = 0,8$ mm.

Fonte: O Autor

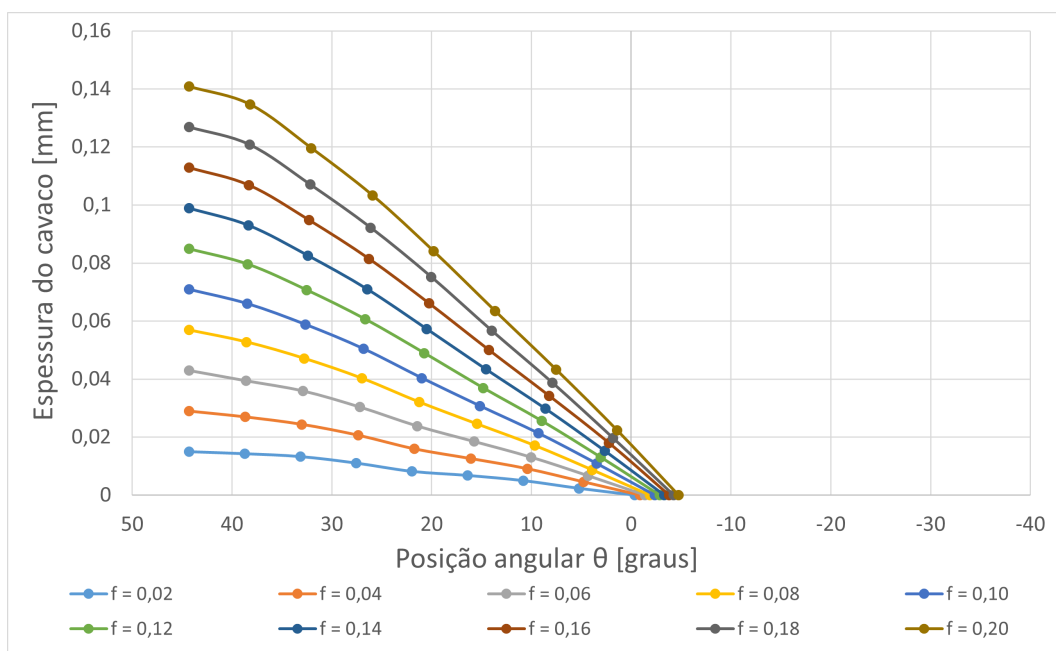


Figura 79 – Variação da espessura de corte ao longo da posição angular para diferentes avanços e $r_{\epsilon} = 1,2$ mm.

Fonte: O Autor

Nota-se que quanto maior o avanço, mais distante de zero e negativa será a posição angular inicial do cavaco gerado, havendo maior uso da aresta secundária Além disso, observa-se que para $r_{\epsilon} = 0,2$ mm, as curvas que descrevem a espessura de corte se aproximam de logarítmicas quando $f \geq 0,10$ mm/volta enquanto se aproximam mais de retas para $f < 0,10$ mm/volta. Esta tendência à estabilização da espessura para maiores

valores de avanço é reduzida com o aumento do raio de ponta, sendo que, nestes casos, maior parte do cavaco se forma na região curva da ferramenta.

4.2 ANÁLISE DA ÁREA DA SUPERFÍCIE DE CONTATO FERRAMENTA-CAVACO

Para o cálculo da força de corte, é fundamental conhecer a área de contato entre ferramenta e peça. Para isso, a profundidade de usinagem foi fixada em $a_p = 2,0$ mm e o raio de ponta da ferramenta em $r_\epsilon = 0,8$ mm e foram variados apenas os valores de avanço ($f = 0,02$ mm/volta e $f = 0,20$ mm/volta) e de raio de aresta ($r_n = 0,01$ mm, $r_n = 0,02$ mm, $r_n = 0,05$ mm e $r_n = 0,10$ mm), sendo posteriormente aferidas as áreas de contato ferramenta-cavaco para segmentos de arcos de $\Delta\theta = 1,0^\circ$.

A variação das áreas em função de θ para diferentes valores de r_n com as condições $f = 0,02$ mm/volta (marcadores triangulares e cores escuras) e $f = 0,20$ mm/volta (marcadores circulares e cores claras) é mostrada no gráfico da Figura 80. Deve-se observar que cada ponto do gráfico não mostra a área acumulada até aquela posição angular, mas sim a área da secção do cavaco (com abertura de um grau) naquela posição angular.

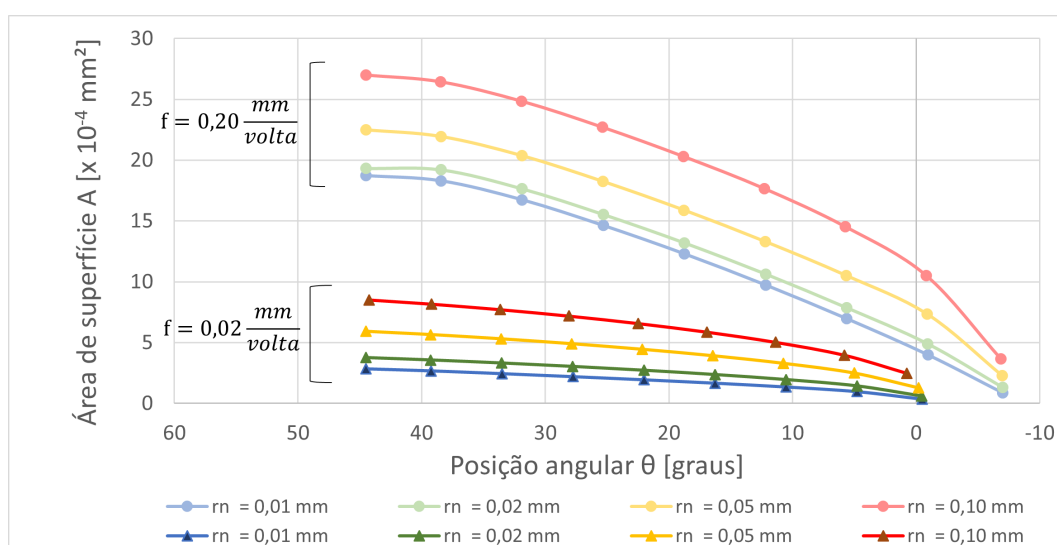


Figura 80 – Variação da área de contato em função da posição angular para diferentes raios de aresta e avanços

Fonte: O Autor

Inicialmente, observa-se que, para todas as curvas, a área de contato ferramenta-cavaco sempre aumenta com o aumento de θ . Isso é facilmente explicado pelo contínuo aumento da espessura de corte h , como discutido na seção anterior. Além disso, pode-se observar que o aumento do raio de aresta sempre leva ao aumento da área ferramenta-cavaco. Como se pode verificar na Figura 81, onde a área de contato ferramenta-cavaco na face da ferramenta A_F é marcada na cor azul e a área de contato ferramenta-cavaco no raio de aresta A_r é marcada na cor verde, o aumento de r_n faz aumentar $A_r\epsilon$, mas

também faz diminuir A_F . Entretanto, devido ao perímetro, a componente $A_r\epsilon$ se mostra mais impactante, como verificado no Gráfico da Figura 80.

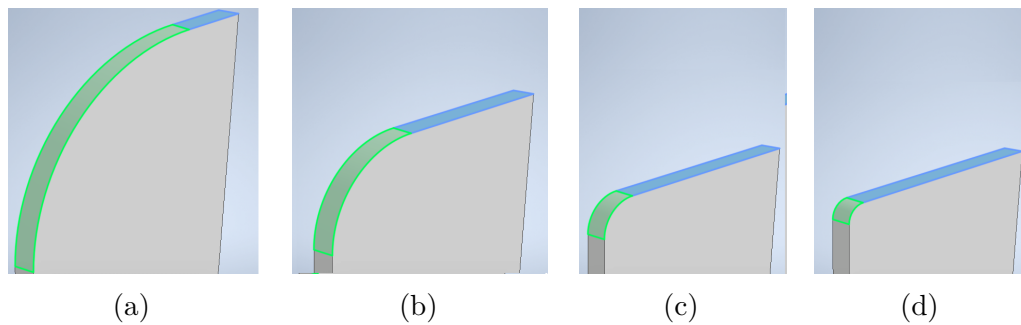


Figura 81 – Segmento do cavaco em $\theta = 30^\circ$ para $f = 0,20$ mm/volta e raio de aresta nas condições $r_n = 0,10$ mm (a), $r_n = 0,05$ mm (b), $r_n = 0,02$ mm (c) e $r_n = 0,01$ mm (d)

Fonte: O Autor

O Gráfico da Figura 80 também mostra que o aumento do avanço sempre leva ao aumento da área de contato. Esse resultado é bastante esperado e intuitivo, uma vez que o aumento do avanço f também leva ao aumento da espessura de corte h . É notável também que as contribuições de A_F e A_r vão variar de acordo com as combinações de avanço e raio de aresta. Os Gráficos das Figura 82 e 83 mostram o quanto da área total é representada por A_r para as condições $f = 0,02$ mm/volta e $f = 0,20$ mm/volta, respectivamente.

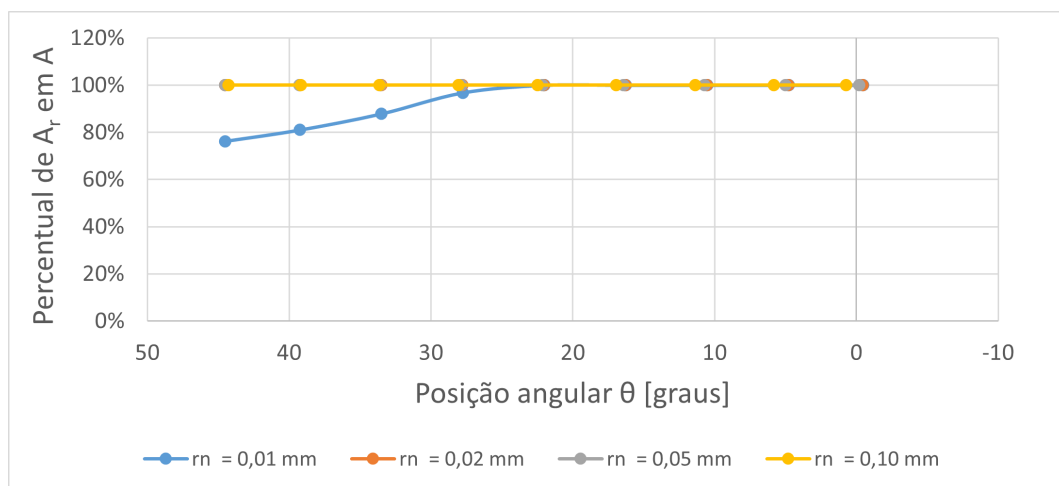


Figura 82 – Participação de A_r na área A ao longo do raio de ponta para $f = 0,02$ mm/volta

Fonte: O Autor

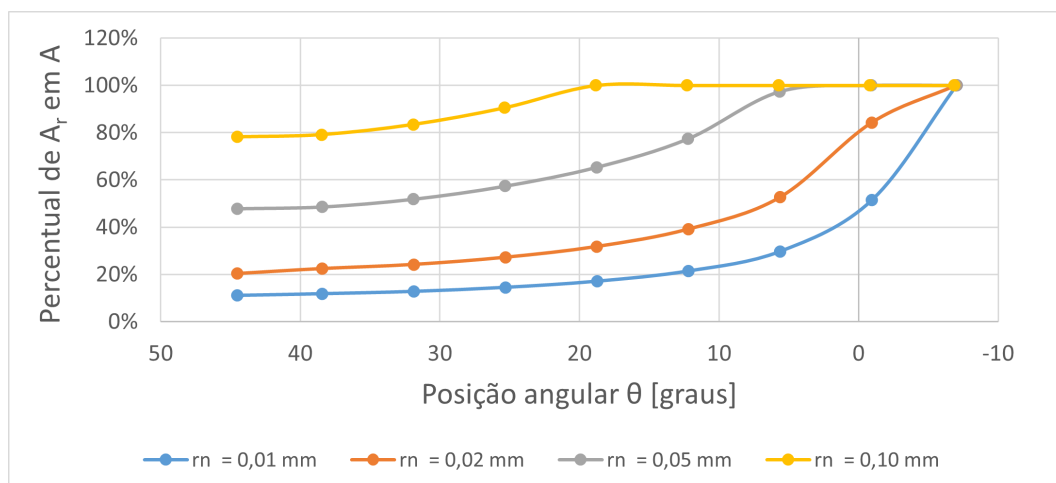


Figura 83 – Participação de A_r na área A ao longo do raio de ponta para $f = 0,20$ mm/volta

Fonte: O Autor

Pode-se verificar que, na condição $f = 0,02$ mm/volta, a componente A_F tem baixa relevância, sendo portanto A_r responsável por quase toda a composição de A . Isso é facilmente explicado pelo fato do avanço ser menor que praticamente todos os raios de aresta, com exceção de $r_n = 0,01$ mm. Por outro lado, na condição $f = 0,20$ mm/volta, o avanço é maior que todos os raios de aresta, fazendo com que a componente A_F já se faça presente logo nos primeiros valores positivos de θ . Finalmente, isso explica o aumento da taxa de crescimento de A ao longo do raio de ponta com o aumento de f no Gráfico da Figura 80. Ou seja, quanto maior for o avanço, maior será a inclinação das curvas de A versus θ .

4.3 ANÁLISE DA PRESSÃO ESPECÍFICA PARA DIFERENTES MATERIAIS

Utilizando-se a Equação 1 e os valores de espessura de corte apresentados anteriormente, bem como os parâmetros apresentados na Tabela 1, foi possível determinar a pressão específica de corte k_s para diferentes materiais, com $r_n = 0,05$ mm e nas condições $f = 0,02$ mm/volta (Figura 84) e $f = 0,20$ mm/volta (Figura 85).

Tabela 1 – Valores de $1 - z$ e k_{s1} para diferentes materiais.

Material	$1 - z$	k_{s1}
Ck45	0,86	222
42CrMo4	0,74	250
GG26	0,74	116

Fonte: Kienzle, O e Victor, H (1957, apud Ferraresi 1977).

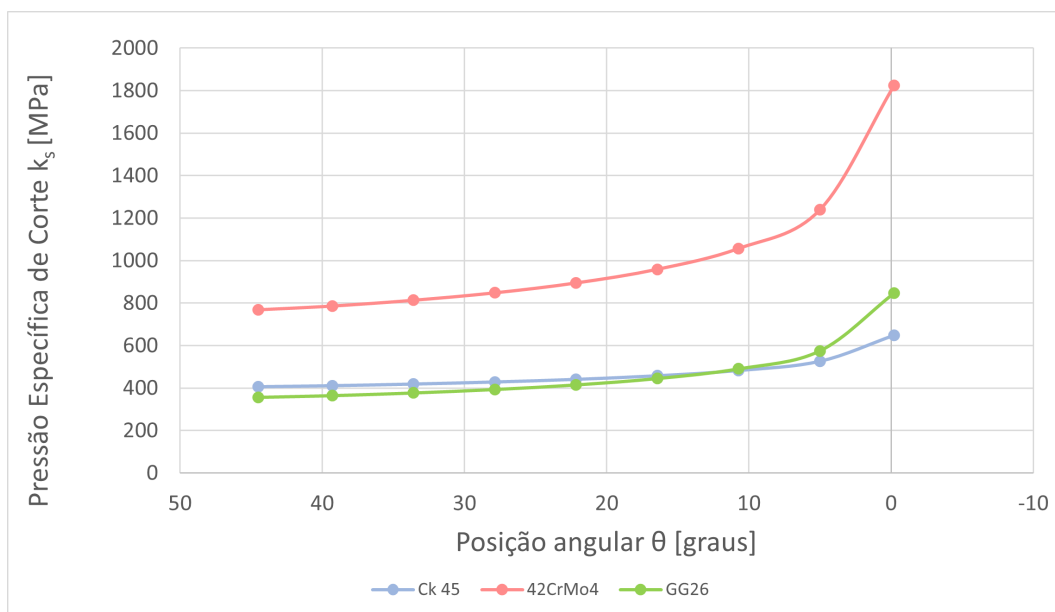


Figura 84 – Variação da pressão específica ao longo da posição angular para $f = 0,02$ mm/volta

Fonte: O Autor

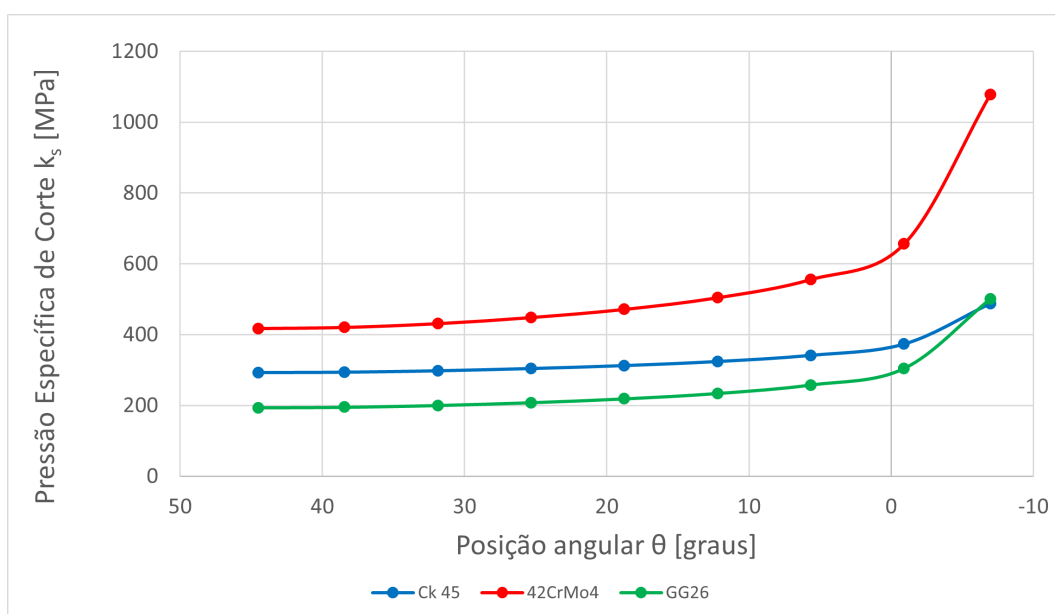


Figura 85 – Variação da pressão específica ao longo da posição angular para $f = 0,20$ mm/volta

Fonte: O Autor

Com os resultados, comprova-se que a pressão específica de corte é maior na região da ponta da ferramenta, onde há espessuras de corte menores. O aumento da espessura, seja em função da posição angular ou do avanço, leva à redução de k_s , conforme já previsto. Verifica-se ainda que a liga de cromo-molibdênio causa maiores valores de k_s em comparação ao aço Ck 45 e ao ferro fundido GG 26.

4.4 ANÁLISE DA FORÇA DE CORTE PARA DIFERENTES CONDIÇÕES

A força de corte pôde ser obtida através do produto entre área de contato e pressão específica. Os resultados dessa análise ao longo do raio de ponta para, para Ck 45, com a aplicação de diferentes raios de aresta, avanços $f = 0,02$ mm/volta e $f = 0,20$ mm/volta e profundidade de usinagem fixada em $a_p = 2,0$ mm, são apresentados nos gráficos das Figuras 86 e 87, respectivamente. É importante destacar que os valores apresentados em cada ponto do gráfico não se referem à força acumulada até aquela posição angular, mas sim à força calculada apenas na secção do cavaco posicionada naquela posição angular.

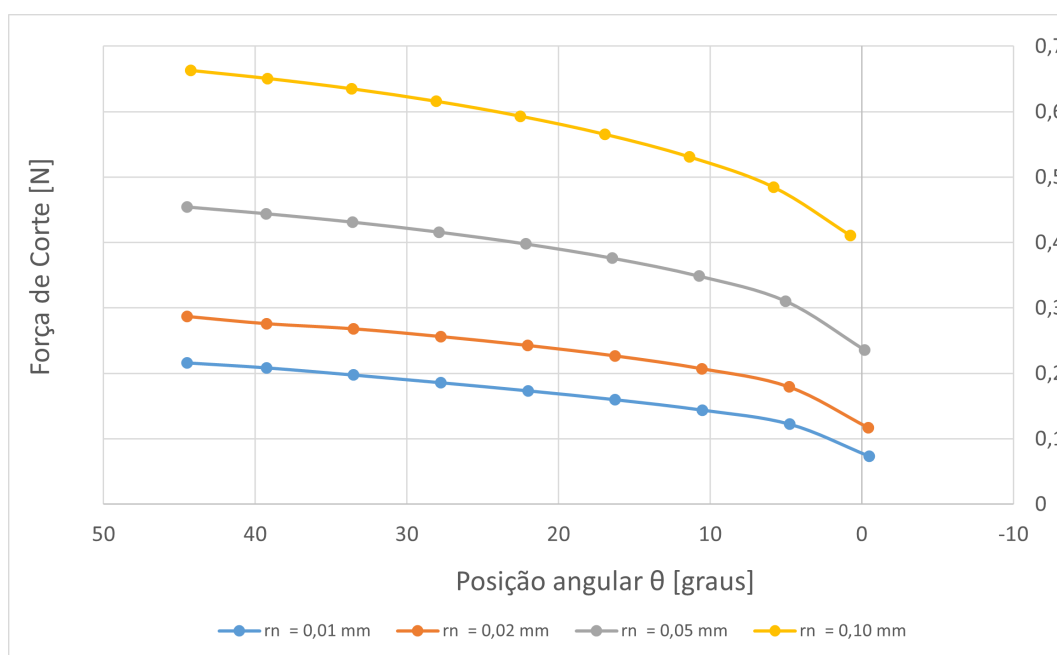


Figura 86 – Força de corte calculada para a condição de $f = 0,02$ mm/volta
Fonte: O Autor

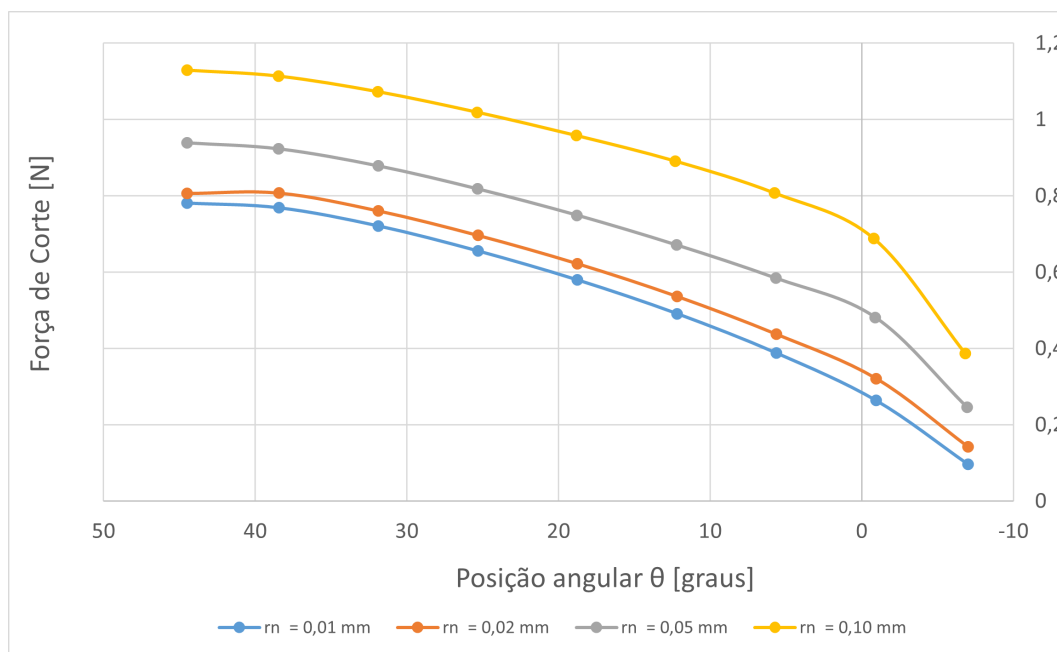


Figura 87 – Força de corte calculada para a condição de $f = 0,20$ mm/volta
 Fonte: O Autor

Em ambos os gráficos, verifica-se um crescimento não linear da força de corte ao longo do raio de ponta, o que pode ser explicado pelo aumento da espessura de corte. Esse resultado se deve às tendências já observadas e discutidas: apesar de o avanço aumentar a área de contato, ele faz diminuir a pressão específica, fazendo com que o produto entre esses dois componentes seja crescente, mas não de forma linear. Assim, nota-se que foi necessário a redução de uma ordem de grandeza no avanço para se obter aumentos menos expressivos na força de corte. Observa-se também que o aumento do raio de aresta leva ao aumento da força de corte. Tendo sido a força de corte calculada através do produto entre pressão específica e área de contato, certamente esse efeito é explicado pelo aumento da componente de área A_r , como discutido anteriormente. Em outras palavras, aumentar o raio de aresta faz aumentar a componente A_r , que faz aumentar a área de contato total, e consequentemente a força de corte. Cabe destacar, no entanto, que tal explicação é válida apenas no caso em que o comportamento da pressão específica de corte não se altera para os diferentes raios. Na prática, entende-se que os valores de k_s seriam maiores para maiores raios de aresta, o que manteria a tendência observada, mas alteraria as diferenças entre as diferentes condições.

5 CONCLUSÃO

A partir da construção, aplicação e análise de um modelo gráfico do contato ferramenta-cavaco em software CAD, puderam ser tiradas as seguintes conclusões: - A espessura do cavaco depende do avanço e da posição angular ao longo do raio de ponta. Neste sentido, sua variação é diretamente impactada pela dimensão deste raio. Por exemplo, a diminuição do raio de ponta leva a cavacos com maior espessura em $\theta = 0^\circ$. - A análise evidenciou uma tendência logarítmica das curvas de espessura versus posição angular quando o avanço se torna muito maior que o raio de ponta, fazendo com que o cavaco tenha grandes espessuras nas regiões mais próximas da ponta da ferramenta. Assim, aumentar o avanço ou diminuir o raio de ponta faz com que o cavaco tenha maiores espessuras de modo geral. - Aumentar a espessura do cavaco leva ao aumento da área de contato ferramenta-cavaco. Essa espessura é compartilhada entre a região da face e a região do raio de aresta, de modo que aumentar o raio de aresta leva a um aumento da área de contato na região do raio A_r , mas a uma diminuição na região da face A_F . No entanto, o saldo se mostra positivo para A_r , de forma que o aumento do raio de aresta sempre aumenta a área total. - Devido à menor espessura do cavaco, a pressão específica apresenta valores aproximadamente duas vezes maiores na região da ponta da ferramenta em comparação ao restante do contato. - Em função dos efeitos opostos de aumento da área e redução da pressão específica de corte ao longo do raio de ponta, a força de corte tende a aumentar, mas de forma não linear.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho deixa diversas oportunidades de expansão do estudo. Dentre elas, talvez a mais impactante seja a validação empírica dos resultados obtidos e apresentados. Se o modelo puder ser validado, então se tornará mais interessante a sua expansão a outras análises e aperfeiçoamento. É importante destacar que é esperado que experimentos nas mesmas condições resultem em valores maiores de forças devido à existência de mecanismos não abordados nesse trabalho. Por exemplo, como explica MACHADO *et al.*, parte do material da peça não se transforma em cavaco, pois escorrega entre a peça e a ferramenta em virtude do retorno elástico do material da peça, consumindo parcelas de energia e aumentando k_s , especialmente quando o avanço é baixo. Após validação, pode ser interessante verificar o impacto de outras variáveis sobre as dimensões do cavaco, como, por exemplo, o ângulo de posição e o ângulo de ponta da ferramenta. Também não foi verificado no presente trabalho os impactos diretos do raio de ponta sobre a distribuição da pressão específica e da força de corte, visto que nessas análises o raio de ponta não era uma variável.

REFERÊNCIAS

- BALOGUN, V. A.; MATIVENGA, P. T. Impact of un-deformed chip thickness on specific energy in mechanical machining processes. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 69, p. 260–268, 2014. Citado na página 13.
- CHOUDHURY, S.; Appa Rao, I. Optimization of cutting parameters for maximizing tool life. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 39, n. 2, p. 343–353, 1999. ISSN 0890-6955. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695598000285>>. Citado na página 10.
- DENKENA, B.; HELMECKE, P.; HÜLSEMEYER, L. Energy efficient machining of ti-6al-4v. **CIRP Annals**, Elsevier, v. 64, n. 1, p. 61–64, 2015. Citado na página 10.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. [S.l.]: Blucher, 1977. Citado 4 vezes nas páginas 12, 13, 46 e 53.
- JADHAV, J.; JADHAV, B. Experimental study of effect of cutting parameters on cutting force in turning process. **International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering**, v. 1, n. 6, p. 240–248, 2014. Citado na página 13.
- KORKA, Z. I.; MICLOȘINĂ, C.-O.; COJOCARU, V. An experimental study of the cutting forces in metal turning. **Analele Universității “Eftimie Murgu” Reșița Anul XX**, n. 2, p. 25–32, 2013. Citado na página 13.
- LI, Z. Z.; ZHANG, Z. H.; ZHENG, L. Feedrate optimization for variant milling process based on cutting force prediction. **The International Journal of Advanced Manufacture Technology**, v. 24, n. 7, p. 541–552, 2004. Citado na página 10.
- MACHADO, R. *et al.* **Teoria da usinagem dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2015. E-book. Disponível em: <<https://plataforma.bvirtual.com.br>>. Acesso em: 27 jan. 2025. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 65.
- OTALORA-ORTEGA, H.; OSORO, P. A.; ARRIOLA, P. A. Uncut chip geometry determination for cutting forces prediction in orthogonal turn-milling operations considering the tool profile and eccentricity. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 198, p. 106351, 2021. ISSN 0020-7403. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740321000862>>. Citado na página 13.
- SCHULTHEISS, F. *et al.* Influence of the minimum chip thickness on the obtained surface roughness during turning operations. **Procedia CIRP**, v. 13, p. 67–71, 2014. ISSN 2212-8271. 2nd CIRP Conference on Surface Integrity (CSI). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114000134>>. Citado na página 13.
- TANGJITSITCHAROEN, S. In-process investigation of turning process applied with and without cutting fluid. **Journal of Mechanical Engineering (JMechE)**, Faculty of Mechanical Engineering and University Publication Centre (UPENA), v. 6, n. 1, p. 85–100, 2009. Citado na página 14.

TOOLS, S. **Evolução dos modelos de espessura do cavaco no fresamento**. 2021. Disponível em: <https://www.arandanet.com.br/revista/mm/artigo_tecnico/50-Evolucao-dos-modelos-de-espessura-do-cavaco-para-fresamento.html>. Atualizado em 12/05/2021. Citado na página 14.

ZHAO, H. *et al.* Cutting parameters optimization for constant cutting force in milling. In: **e-Engineering Digital Enterprise Technology**. [S.l.]: Trans Tech Publications Ltd, 2008. (Applied Mechanics and Materials, v. 10), p. 483–487. Citado na página 10.

