

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

VINÍCIUS AUGUSTO FIGUEIRA NAVI

**PREVISÃO DAS TENSÕES TÉRMICAS EM FERRAMENTA DE  
CORTE DURANTE PROCESSO DE TORNEAMENTO**

SÃO CARLOS  
2025

VINÍCIUS AUGUSTO FIGUEIRA NAVI

**PREVISÃO DAS TENSÕES TÉRMICAS EM FERRAMENTA DE  
CORTE DURANTE PROCESSO DE TORNEAMENTO**

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

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Tácito Malavolta

SÃO CARLOS  
2025



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEMec/CCET

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905  
Telefone: (16) 33519703 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 2/2025/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

VINICIUS AUGUSTO FIGUEIRA NAVI

PREVISÃO DAS TENSÕES TÉRMICAS EM FERRAMENTA DE CORTE DURANTE PROCESSO DE TORNEAMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 20 de fevereiro de 2025

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Alexandre Tácito Malavolta
Membro da Banca 1	Carlos Eiji Hirata Ventura
Membro da Banca 2	Alexandre de Oliveira Dias



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Tácito Malavolta, Docente**, em 20/02/2025, às 15:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Eiji Hirata Ventura, Docente**, em 20/02/2025, às 15:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre de Oliveira Dias, Professor(a) do Ensino Superior**, em 20/02/2025, às 15:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **1741701** e o código CRC **9AE805C2**.

Aos meus pais, por se doarem tanto para que eu tivesse tudo.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus pelas bênçãos e por guiar todo o meu caminho. Desde a entrada na faculdade e durante todos os momentos de dificuldade a certeza que Deus está ao meu lado em todos os momentos me fizeram continuar até chegar esse momento de conclusão da graduação. Toda honra e glória seja dada a Jesus.

Agradeço imensamente à minha família por permitirem tudo o que eu vivi e todas as oportunidades que tive na vida. Minha mãe, Neiva, meu pai, Silvio, e minha irmã, Sarah, sempre me apoiaram e fizeram todo o possível para me proporcionar as melhores condições de estudo. Esta graduação somente foi possível devido à dedicação e esforço de todos.

Agradeço aos meus amigos que me acompanharam durante todo este tempo: Cauê, Cícero, Eduardo, Felipe, Lucas, Marcelo, Thales e Victor. Obrigado pelo companheirismo e companhia em todos os momentos de estudo, trabalhos e também de lazer, no qual nos permitiram percorrer todo o caminho e atingir nossos objetivos. Certamente sem vocês tudo seria muito mais difícil.

Também sou grato aos colegas do estágio, da Engrenar Jr e do time de Tênis da UFSCar, no qual tive o contato durante muitos anos. As experiências e aprendizados nos meios acadêmicos e pessoal foram parte importante da minha formação e sou grato pelo tempo dividido com vocês.

Expresso meu profundo agradecimento ao professor Alexandre Malavolta por toda a ajuda, orientação e ensinamentos para o desenvolvimento deste trabalho. Obrigado por toda disponibilidade e empenho para me auxiliar e por todo o conhecimento no qual o senhor compartilhou comigo durante a realização deste estudo. Sua orientação foi essencial para o sucesso deste projeto e por isso te agradeço.

Finalizo agradecendo a todos os professores do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar no qual tive a oportunidade de aprender e me desenvolver academicamente e profissionalmente. Agradeço por contribuir de maneira significativa em minha formação.

## RESUMO

O processo de torneamento, por ser uma das fases iniciais da fabricação de uma peça, necessita alta qualidade de execução garantidas através da correta usinagem de suas dimensões. Qualquer falha nesta etapa da produção da peça pode gerar falhas na cadeia de processo que futuramente levam a não conformidade do produto, e conseqüentemente, prejuízo financeiro à indústria. Para garantir sua eficiência, um dos parâmetros a ser monitorado e controlado é a qualidade das ferramentas de corte (pastilhas). Cálculos de vida útil da ferramenta, análise de sua capacidade de corte, bem como formas e intensidades de desgaste devem ser realizados para ter melhor controle do processo produtivo. Diante disso, o objetivo da pesquisa foi elucidar o processo de usinagem em seus tipos de usinagem, parâmetros e formulações teóricas; analisar o corte e formação de cavaco especificamente em torneamento; assim como os tipos de pastilha, suas funções no processo e os desgastes que podem sofrer. O estudo também foi realizado nas causas geradoras de cada desgaste e suas conseqüências. Para validação dos resultados teóricos obtidos foram realizados simulações térmicas e estruturais, através do Método de elementos finitos (FEM) dos insertos para comparação com a literatura, utilizando de condições de usinagem usadas em tornos para fabricação de um eixo piloto usado em transmissões de caminhões e ônibus. Com isso, foram obtidos as temperaturas máximas na ferramenta e as regiões de concentração de tensão na superfície superior no qual pode ocorrer o desgaste de cratera, e nas superfícies de folga e aresta de corte, no qual podem ocorrer os desgastes de flanco e de entalhe, respectivamente.

Palavras-chave: Torneamento; Desgaste ferramenta; Modelo Elementos Finitos (FEM).

## ABSTRACT

The turning process, as one of the initial phases of machining a part, requires high quality execution guaranteed through the correct dimensions measurement. Any failure in this stage of part production generates failures in the process chain that will lead to future product non-conformity and, consequently, financial loss to the industry. To ensure its efficiency, one of the parameters to be monitored and controlled is the quality of the cutting tools (inserts). Calculations of tool life, analysis of its cutting capacity, as well as forms and intensities of wear must be performed to have better control of the production process. In view of this, the objective of the research was to elucidate the machining process in its types of machining, parameters and theoretical formulations; to analyze cutting and chip formation specifically in turning; as well as the types of insert, their functions in the process and the wear they may suffer. The study was also carried out on the causes generating each wear and its consequences. To validate the theoretical results obtained, thermal and structural simulations were performed using the Finite Element Method (FEM) of the inserts for comparison with the literature, using machining conditions used on a lathe to manufacture an input shaft for truck and bus transmissions. With this, the maximum temperatures in the tool and the regions of stress concentration on the upper surface where crater wear can occur, and on the clearance surfaces and cutting edge, where flank and notch wear can occur, respectively, were obtained.

Keywords: Turning; Tool wear; Finite Element Model (FEM).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de processo de fabricação . . . . .	17
Figura 2 – Parâmetros do fresamento frontal . . . . .	18
Figura 3 – Comparação entre fresamento discordante e concordante . . . . .	19
Figura 4 – Processo de furação . . . . .	19
Figura 5 – Tipos de processo de furação . . . . .	20
Figura 6 – Tipos de operação de torneamento . . . . .	21
Figura 7 – Parâmetros de usinagem . . . . .	23
Figura 8 – Mecanismo de formação de cavaco . . . . .	24
Figura 9 – Tipos de cavaco . . . . .	25
Figura 10 – Formato do inserto . . . . .	26
Figura 11 – Formato da seção transversal do inserto . . . . .	26
Figura 12 – Comprimento de aresta de corte . . . . .	27
Figura 13 – Quebra-cavaco . . . . .	28
Figura 14 – Pastilha quebrado por impacto na máquina . . . . .	29
Figura 15 – Desgaste de cratera . . . . .	29
Figura 16 – Desgaste de flanco . . . . .	30
Figura 17 – Desgaste de entalhe . . . . .	31
Figura 18 – Formação de aresta postiça de corte . . . . .	32
Figura 19 – Tipos de abrasão mecânica . . . . .	32
Figura 20 – Desgaste por aderência . . . . .	33
Figura 21 – Simulação FEM térmica . . . . .	34
Figura 22 – Simulação FEM de desgaste de cratera . . . . .	35
Figura 23 – Região de estudo do eixo de transmissão . . . . .	36
Figura 24 – Caixa do inserto utilizado . . . . .	37
Figura 25 – Porta-ferramenta posicionado na máquina . . . . .	38
Figura 26 – Gráfico de Módulo de Young do WC-Co em função da temperatura . . . . .	39
Figura 27 – Gráfico do coeficiente de Poisson do WC-Co em função da temperatura . . . . .	40
Figura 28 – Gráfico da condutividade térmica do WC-Co em função da temperatura . . . . .	40
Figura 29 – Gráfico do calor específico do WC-Co em função da temperatura . . . . .	41
Figura 30 – Gráfico da potência aplicada no torneamento . . . . .	41
Figura 31 – Formato do cavaco gerado . . . . .	43
Figura 32 – Região de contato ferramenta-cavaco . . . . .	44
Figura 33 – Dimensões da região de contato ferramenta-cavaco . . . . .	44
Figura 34 – Parâmetros de corte . . . . .	46
Figura 35 – Conjunto de equações para cálculo de $l_c$ . . . . .	48
Figura 36 – CAD inserto com região ferramenta-cavaco em destaque . . . . .	51

Figura 37 – Malha desenvolvida para simulação . . . . .	51
Figura 38 – Gráfico de potência x tempo para simulação com $D_w = 37$ mm . . . . .	53
Figura 39 – Gráfico de potência x tempo para simulação com $D_w = 30$ mm . . . . .	54
Figura 40 – CAD com detalhe para região de aplicação da potência . . . . .	55
Figura 41 – Pastilha posicionada no porta-ferramenta . . . . .	55
Figura 42 – Sistema com malha e potência preparadas para simulação estrutural . . . . .	56
Figura 43 – Sistema com todos os parâmetros prontos para simulação estrutural . . . . .	57
Figura 44 – Simulação térmica do inserto para os dois casos . . . . .	58
Figura 45 – Ponto selecionado para estudo da temperatura . . . . .	59
Figura 46 – Gráfico de temperatura por tempo para $D_w = 37$ mm . . . . .	59
Figura 47 – Gráfico de temperatura por tempo para $D_w = 30$ mm . . . . .	60
Figura 48 – Comparação dos resultados das simulações para $D_w = 37$ mm . . . . .	61
Figura 49 – Comparação dos resultados das simulações para $D_w = 30$ mm . . . . .	61
Figura 50 – Comparação do resultado das tensões na simulação e desgaste de cratera em ferramenta . . . . .	62
Figura 51 – Comparação do resultado das tensões na simulação e desgaste de entalhe e de flanco em ferramenta . . . . .	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do 25Mo4Cr . . . . .	37
Tabela 2 – Propriedades do metal duro (WC-Co) . . . . .	39
Tabela 3 – Diâmetro inicial e final do eixo . . . . .	42
Tabela 4 – Parâmetros de usinagem utilizados . . . . .	42
Tabela 5 – Valores experimentais dos parâmetros de usinagem e de corte . . . . .	47
Tabela 6 – Equações de verificação . . . . .	47
Tabela 7 – Valores para cálculo de $l_c$ segundo Astakhov (2010) . . . . .	47
Tabela 8 – Valores para cálculo de $l_c$ segundo Lee e Shaffer (1951) . . . . .	48
Tabela 9 – Valores para cálculo de $P_{fR}$ . . . . .	50
Tabela 10 – Valores para cálculo de Potência corrigida . . . . .	50
Tabela 11 – Valores de Módulo de Young utilizados na simulação . . . . .	52
Tabela 12 – Valores de Condutividade térmica utilizados na simulação . . . . .	52
Tabela 13 – Valores de Calor específico utilizados na simulação . . . . .	53
Tabela 14 – Valores de potência utilizados nas simulações . . . . .	54
Tabela 15 – Valores de coeficiente convectivo . . . . .	55

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	<i>Computer Aided-Design</i>
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\phi$	Ângulo de cisalhamento
$\kappa_r$	Ângulo de posição da ferramenta
$\kappa_{r1}$	Ângulo de posição da ferramenta
$\gamma$	Ângulo de saída
$f_n$	Avanço
$c$	Calor específico
$\alpha$	Coefficiente de dilatação térmica
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$l_c$	Comprimento de contato ferramenta-cavaco
$\lambda$	Condutividade térmica
$\rho$	Densidade
$D_w$	Diâmetro da peça
$t_2$	Espessura do cavaco
$t_1$	Espessura do cavaco não cortado
$h_1$	Espessura de cavaco não deformado
$b_{1T}$	Espessura real do cavaco
$t_{1T}$	Espessura real do cavaco não cortado
$\sigma_{UTS}$	Máxima resistência à tração do material de trabalho
$n$	Módulo de elasticidade
$P_{pd}$	Potência gasta na deformação plástica da camada que está sendo removida
$P_{ch}$	Potência gasta na formação de novas superfícies
$P_{fR}$	Potência gasta na interface ferramenta-cavaco
$P_{fF}$	Potência gasta na interface ferramenta-peça

$P_C$	Potência total
$a_p$	Profundidade de corte
$r_n$	Raio de ponta
$n$	Rotação
$\tau_{max}$	Tensão de cisalhamento máxima no contato ferramenta-cavaco
$\tau_c$	Tensão de cisalhamento média no contato ferramenta-cavaco
$\zeta$	Taxa de compressão do cavaco
$T_{max}$	Temperatura máxima
$v_f$	Velocidade de avanço
$v_c$	Velocidade de corte

## SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1 Objetivos	15
1.2 Estrutura do texto	16
<b>2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>17</b>
2.1 Processos de usinagem	17
2.2 Cavaco	23
2.3 Tipos de ferramenta	25
2.4 Tipos de desgaste de ferramenta	28
2.5 Causas geradoras de desgaste	31
2.6 Modelo de elementos finitos (simulação térmica e estrutural)	34
<b>3 – METODOLOGIA</b>	<b>36</b>
3.1 Especificações do sistema analisado	36
3.1.1 Peça usinada	36
3.1.2 Inserto e porta-ferramenta	37
3.1.3 Condições de usinagem	41
3.1.4 Cavaco gerado	42
3.1.5 Comprimento de contato ferramenta-cavaco ( $l_c$ )	43
3.1.6 Potência aplicada na ferramenta-cavaco ( $P_{fr}$ )	48
3.2 Simulação térmica	51
3.3 Simulação estrutural (termoelástica)	56
<b>4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>58</b>
4.1 Simulação térmica	58
4.2 Simulação estrutural (termoelástica)	60
<b>5 – CONCLUSÃO</b>	<b>64</b>
5.1 Trabalho presente	64
5.2 Trabalhos futuros	64
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>65</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O processo de torneamento é uma das operações mais comuns na usinagem de peças metálicas, no qual destaca-se principalmente a fabricação de sólidos de revolução, ou seja, componentes com geometrias cilíndricas. Esta operação baseia-se na remoção de material da peça através do corte por uma ferramenta de corte de material mais duro, geralmente em formato de lâmina. Neste caso, a peça é fixada no torno e a ferramenta realiza dois movimentos: de avanço em direção a peça e de rotação, assim, deformando plasticamente a peça até sua ruptura, obtendo o formato desejado (MACHADO *et al.*, 2009).

O torneamento é fundamental para produzir peças com alta precisão e bom acabamento superficial, e tem aplicação em diversas indústrias, tais como automotiva, aeronáutica, metalúrgica, e muitas outras. Ademais, é possível torner outras geometrias como cones e roscas, e ainda atingir boas tolerâncias.

Alguns parâmetros são os responsáveis pela qualidade e pelo preço deste processo, tais como velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, material do inserto. Sendo assim, a busca pela maior produtividade é um dos desafios para toda indústria no qual utiliza esta operação. Calcular e entender a melhor relação entre velocidade de produção de peças minimizando os desgastes de ferramenta, e conseqüentemente, menos troca de inserto e menor custo do processo, são primordiais (MACHADO *et al.*, 2009).

Ademais, através de simulações computacionais pode-se prever o comportamento da peça, bem como da ferramenta de corte durante o processo de torneamento. Desta forma, a realização de uma simulação térmica sem a presença de cavaco torna-se interessante para observar as tensões térmicas presentes e suas regiões de atuação.

## 1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo analisar as tensões térmicas atuantes na região de contato ferramenta-peça em um inserto durante o processo de torneamento de um eixo de transmissão de caminhão. O intuito do estudo é analisar as temperaturas e tensões, bem como suas regiões atuantes e os desgastes que a pastilha estará submetida, comparando com os resultados esperados de acordo com a literatura existente.

Para obter esse objetivo geral os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- Realizar um levantamento com todos os parâmetros de usinagem de um eixo em produção;
- Calcular todas as forças e dimensões necessárias para desenhar os corpos em 3D;

- Desenvolver um modelo 3D do inserto e do porta-ferramenta para realizar a simulação do sistema;
- Fazer simulações térmica e estrutural do inserto com todas as condições estabelecidas para realizar o estudo;
- Analisar e comparar os resultados obtidos na simulação com os esperados pela literatura.

## 1.2 Estrutura do texto

Esta monografia se organiza da seguinte forma:

- Capítulo 1 apresenta uma introdução do assunto a ser tratado pelo trabalho bem como seus objetivos gerais e específicos;
- Capítulo 2 refere-se a revisão bibliográfica da teoria e formulação matemática sobre usinagem, torneamento, formação de cavaco, ferramentas e tipos de desgaste;
- Capítulo 3 descreve a metodologia da simulação térmica e estrutural pelo método dos elementos finitos, definição e refinamento de malha e esforços atuantes;
- Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos com a simulação e análises ao comparar com o esperado pela literatura;
- Capítulo 5 finaliza com as conclusões da pesquisa e indicações de trabalhos futuros.

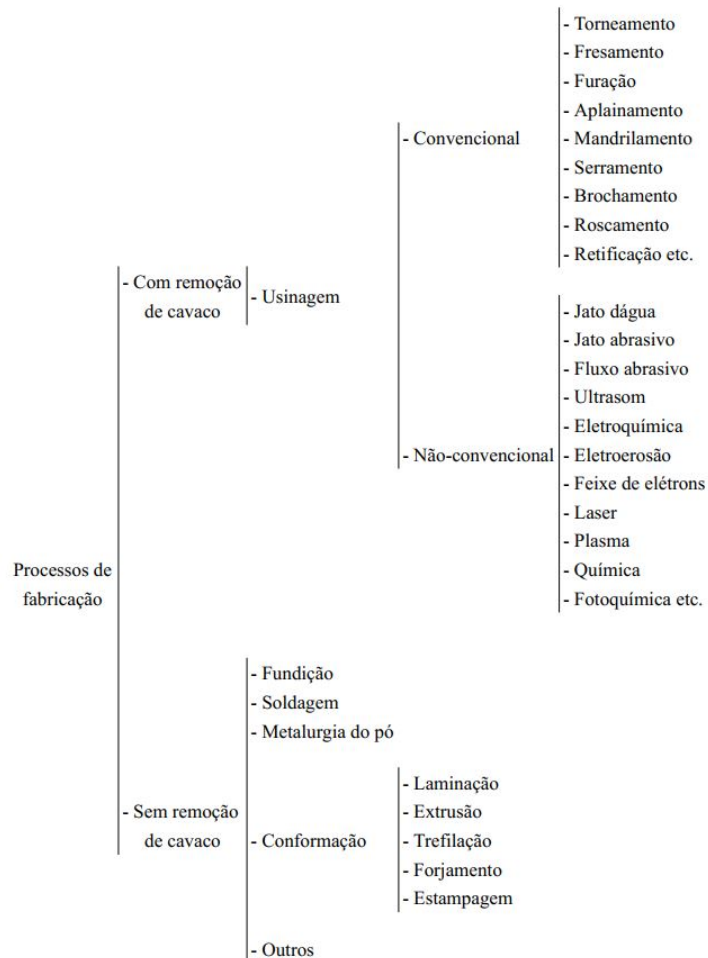
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Processos de usinagem

O processo de usinagem pode ser basicamente descrito como a remoção de material de um corpo através do corte por outro material mais duro. Contudo, existem diversas operações de fabricação, sendo estas as chamadas convencionais ou não-convencionais, que diferem-se tanto no processo de retirada de material como nas propriedades obtidas a partir delas. Todas possuem suas peculiaridades e envolvem diversas variáveis a serem controladas, dessa forma, valendo um estudo para que em cada operação seja utilizada a técnica mais apropriada.

Uma figura que ilustra essa vasta gama de processos de fabricação é mostrada em Machado *et al.* (2009), conforme Figura 1.

Figura 1 – Tipos de processo de fabricação



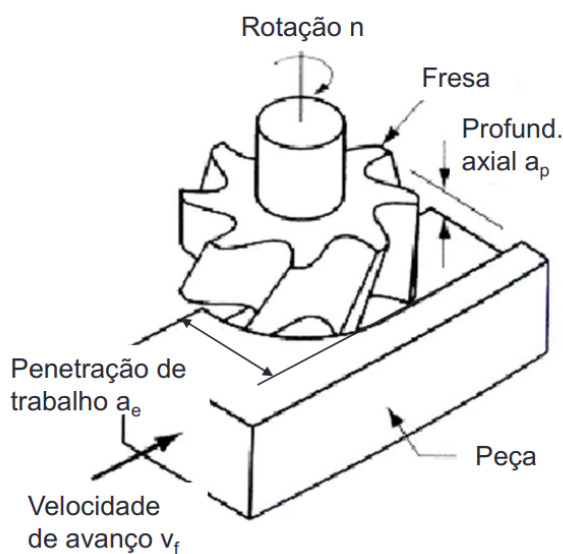
(MACHADO *et al.*, 2009)

Para esta presente seção serão aprofundados alguns conceitos das principais

operações de usinagem convencional a fim de elucidar os pontos em que se diferenciam.

Inicialmente, o processo de fresamento trata-se de uma operação em que a peça avança em direção a uma ferramenta rotativa com várias arestas, geralmente com o eixo de rotação perpendicular à direção de avanço. No fresamento é possível garantir alta taxa de remoção de material, além de conseguir produzir geometrias diversas, devido às suas múltiplas arestas de cortes (DIB; BENJAMIN; JASINEVICIUS, 2015). Uma ilustração do fresamento frontal pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 – Parâmetros do fresamento frontal

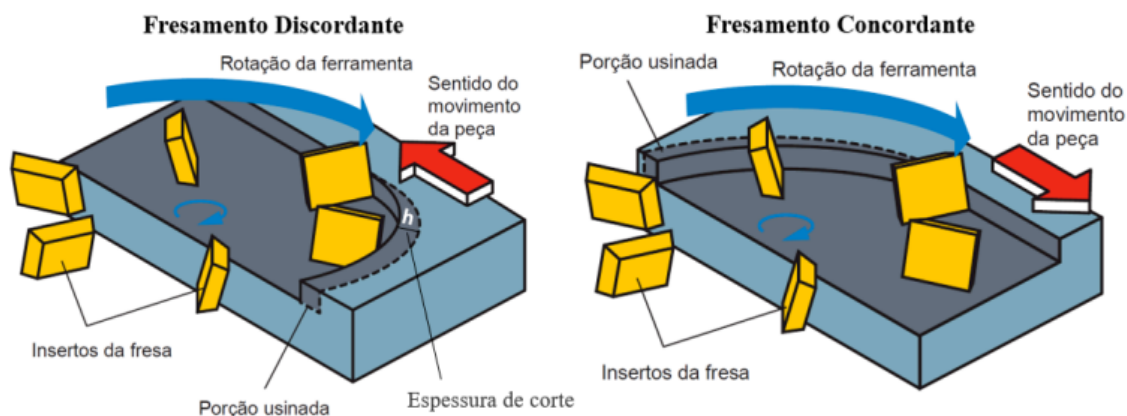


(MACHADO *et al.*, 2009)

Nesta operação, dois tipos de fresamento são importantes de serem destacados, visto que diferentes aplicações vão necessitar de um ou outro corte, são eles fresamento concordante e o fresamento discordante. No primeiro caso, o sentido de movimento de avanço coincide com o sentido de movimento de corte, desta forma, há um maior impacto na aresta de entrada, gerando maior espessura de cavaco na entrada, porém garante que a espessura na saída é pequena, evitando a queima da aresta contra a superfície. No discordante ocorre o contrário, o sentido de movimento de avanço é oposto ao sentido de movimento do corte, isso gera menor espessura de cavaco na entrada, entretanto maior espessura na saída que leva queima da aresta (DIB; BENJAMIN; JASINEVICIUS, 2015).

Na maioria das aplicações o fresamento concordante é o utilizado devido a esta característica de evitar a queima, contudo, para fresamentos tangenciais, gera-se mais folga, e conseqüentemente, mais vibração devido ao corte tender a puxar a peça contra a fresa. Nestes casos específicos, no qual não é possível eliminar essa folga, deve ser preferido o fresamento discordante. Uma imagem mostrando os tipos de fresamento é ilustrada na Figura 3.

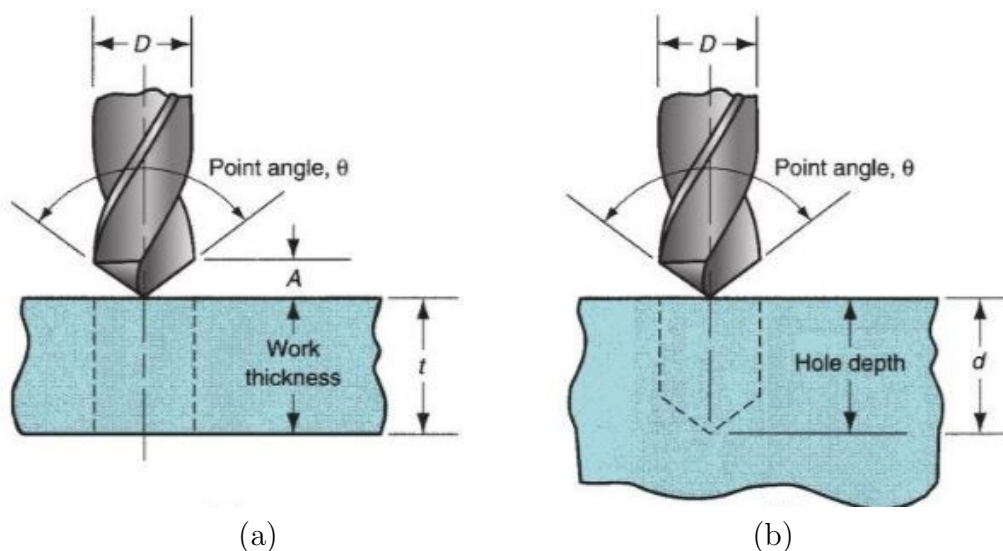
Figura 3 – Comparação entre fresamento discordante e concordante



(MITSUBISHI, 2024)

Outro processo de usinagem comumente utilizado é a furação. Por definição, é um processo mecânico realizado para produzir furos cilíndricos através de uma ferramenta multicortante. Para isso, a ferramenta ou a peça deve possuir uma movimentação de rotação somado a um movimento de avanço na direção do eixo de rotação (BORK, 1995). Uma ilustração é mostrada na Figura 4.

Figura 4 – Processo de furação  
(a) Furo passante e (b) Furo cego



(GROOVER, 2010)

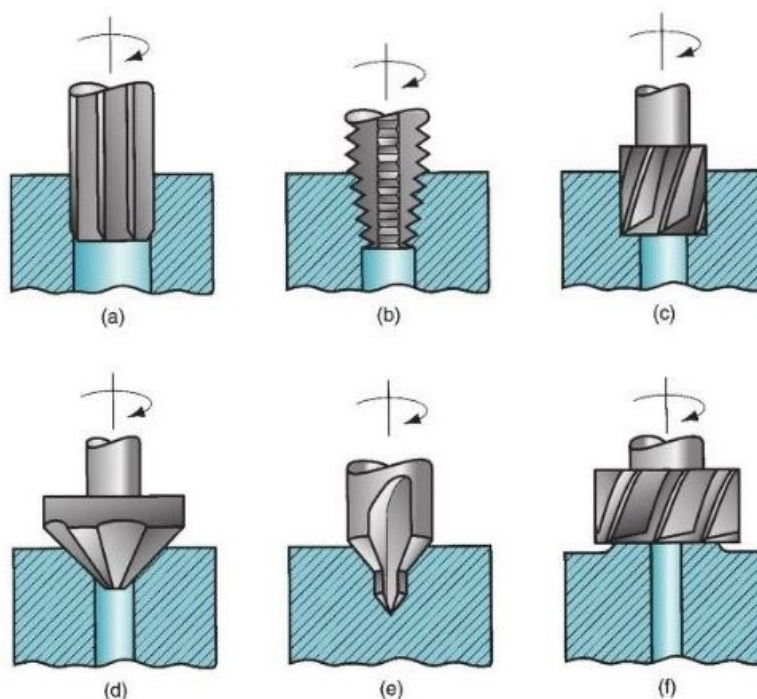
A operação de furação com brocas é uma operação de desbaste, processo de retirada de material que não garante qualidade superficial alta, dessa forma, um processo de acabamento do furo é comumente utilizado, melhorando a superfície usinada. Ademais,

devido à pouca rigidez e potência de furadeiras, em muitos furos é necessário a usinagem de um pré furo, assim garantindo a qualidade no processo.

Para algumas aplicações com furos médios pode-se preferir o uso de broca com inserto intercambiáveis. Esta ferramenta possui baixo custo e tem maior versatilidade, porém não garante tanta estabilidade como uma broca inteiriça de metal duro. Enquanto para furos grandes, desde que passantes, poderia ser escolhido uma ferramenta de trepanação, pois não necessita de grandes potências da máquina (MACHADO *et al.*, 2009).

Uma imagem com diferentes tipos de furação pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 – Tipos de processo de furação  
(a) alargamento; (b) rosqueamento; (c) rebaixamento; (d) escareamento;  
(e) furação de centro e (f) rebaixamento de face



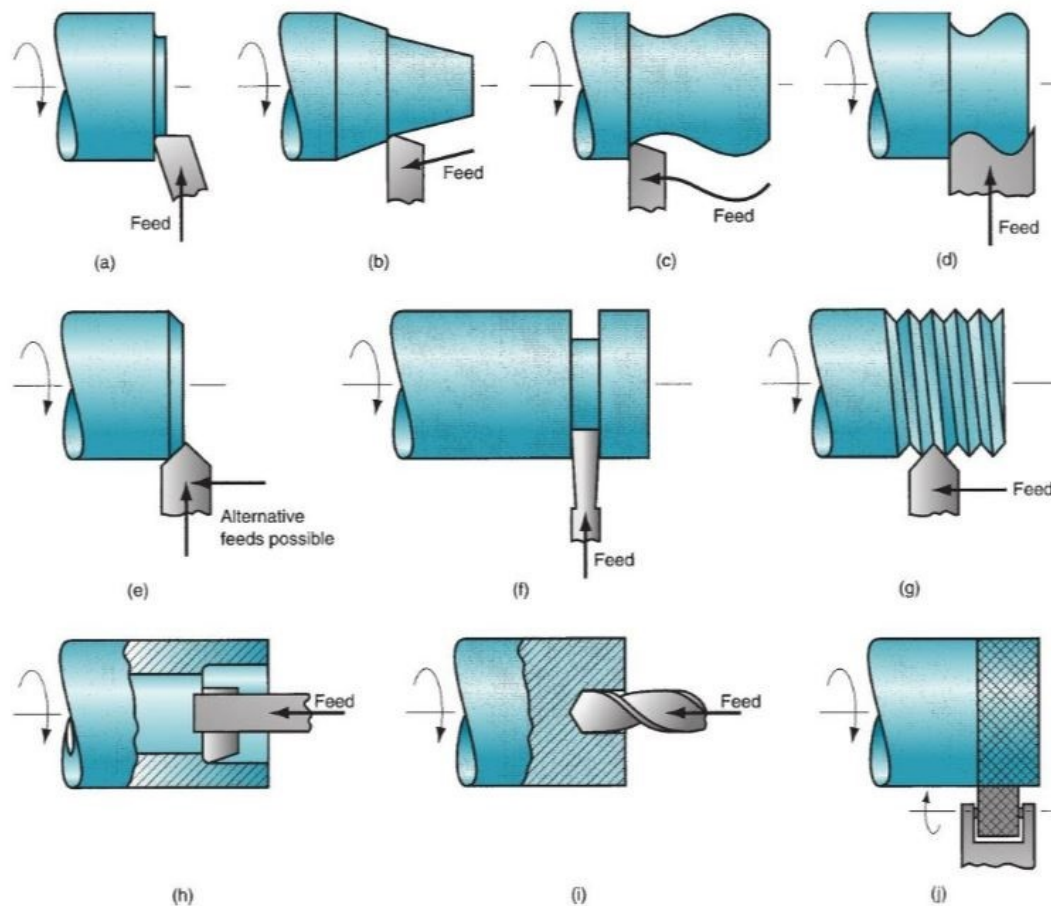
(GROOVER, 2010)

O torneamento é utilizado para fabricação de peças com geometria de revolução, ou seja, peças cilíndricas. Atualmente são usados tornos CNC (Controle Numérico Computadorizado) para produção em escala industrial devido a menor dependência do operador, a capacidade de fabricação de grandes lotes, bem como possuir grande automação e facilidade de operação ao ser comparado com o torno mecânico universal.

Nesta operação a peça gira em torno do seu próprio eixo enquanto a ferramenta de corte realiza um movimento de avanço longitudinal ou transversal em relação a peça. No torneamento é possível usinar o diâmetro externo, diâmetro interno, bem como fazer o faceamento da peça e abertura de canais (FERRARESI, 1969). Uma imagem mostrando as principais operações no torno é mostrada na Figura 6.

Figura 6 – Tipos de operação de torneamento

- (a) faceamento; (b) torneamento cônico; (c) torneamento de perfis; (d) perfilamento;  
 (e) chanframento; (f) sangramento; (g) rosqueamento; (h) mandrilamento;  
 (i) furação e (j) serrilhamento



(GROOVER, 2010)

O processo de torneamento pode ser subdividido em duas grandes categorias, sendo desbaste e acabamento. O desbaste é a etapa no qual ocorre a maior retirada de material da peça. Nela não é priorizada a qualidade final, visto que haverá outra operação para melhorar a rugosidade da peça, portanto é a primeira etapa na fabricação de uma peça. Para esta operação são utilizados maiores avanços ( $f_n$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ), para conseguir maior otimização na remoção de material, em contrapartida, deve-se manter menor velocidade de corte ( $v_c$ ), a fim de não gerar danos à ferramenta de corte, nem avarias à peça (MACHADO *et al.*, 2009).

Desbaste:  $\uparrow f_n \uparrow a_p \downarrow v_c$

No acabamento é a etapa de refinamento da qualidade superficial da peça, ou seja, de melhorar a rugosidade proveniente da operação de desbaste. Geralmente, o acabamento é uma das últimas etapas de fabricação, visto que ela vai refinar e acabar a qualidade do

componente. Para esta operação são utilizados menores avanços ( $f_n$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ), enquanto, utiliza-se maiores velocidade de corte ( $v_c$ ), sendo portanto, oposto aos parâmetros usados no desbaste (MACHADO *et al.*, 2009).

Acabamento:  $\downarrow f_n \downarrow a_p \uparrow v_c$

De acordo com Ferraresi (1969), as seguintes definições são usadas para exemplificar esses importantes parâmetros:

Avanço ( $f_n$ ): movimento da ferramenta na direção axial da peça, quantificado pela distância dada em milímetros percorrida pela ferramenta em uma revolução da peça [mm/rev]. Este valor geralmente é publicado em catálogos de fabricantes de ferramenta, considerando o material da ferramenta e da peça e a operação a ser realizada.

Profundidade de corte ( $a_p$ ): movimento da ferramenta na direção radial da peça, quantificado pela distância em milímetros que a ferramenta adentrou na peça, isto é, quanto maior a profundidade de corte mais material é retirado.

Velocidade de corte ( $v_c$ ): velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido de corte. Alguns fatores são considerados para a escolha correta do valor a ser utilizado, sendo elas: o material da ferramenta e da peça, tipo de fluido refrigerante e condições da máquina. Ela pode ser calculada a partir da seguinte expressão:

$$v_c = \frac{\pi D_w n}{1000} \quad [m/min] \quad (1)$$

sendo:

- $D_w$  = diâmetro da peça [mm]
- $n$  = número de rotações por minuto [rpm]

Velocidade de avanço ( $v_f$ ): velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e sentido de avanço. Ela pode ser calculada a partir da seguinte expressão:

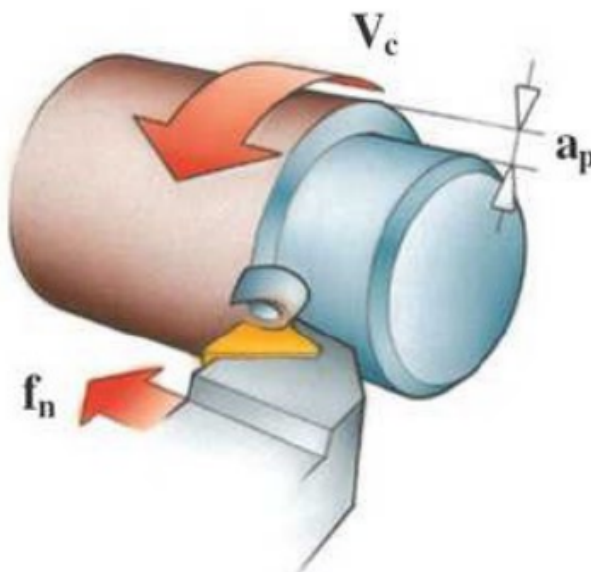
$$v_f = f_n n \quad [mm/min] \quad (2)$$

sendo:

- $f_n$  = avanço [mm/rev]
- $n$  = número de rotações por minuto [rpm]

Uma imagem ilustrando os principais parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) pode ser melhor observado na Figura 7.

Figura 7 – Parâmetros de usinagem



(SANDVIK, 2024)

Existem diversos outros processos de usinagem, conforme mostrado na Figura 1, porém para este presente estudo será focado o processo de torneamento, tratando dos cavacos gerados pelo processo, os inserts para ele utilizado e seus tipos de desgaste, analisando os principais modos de falha bem como suas causas geradoras.

## 2.2 Cavaco

Gerado a partir da remoção do material da peça torneada, o estudo do cavaco tem grande importância pois possibilita fazer estimativas acerca da potência de corte e as forças atuando na ferramenta, além de relacionar com o desgaste das ferramentas de corte. Fatores como geração e fluxo de calor são importantes para entender esses desgastes na ferramenta, portanto, devem ser consideradas.

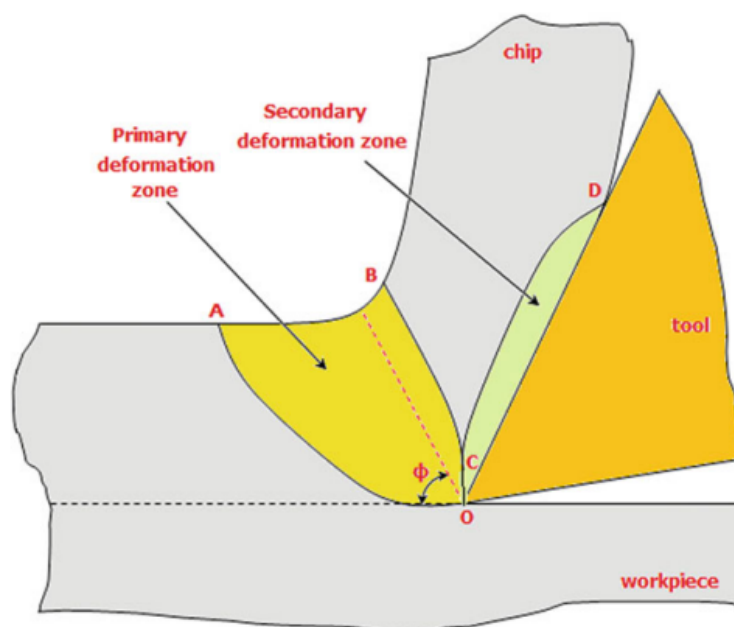
Para tal compreensão, segundo Machado *et al.* (2009) o processo deve ser dividido em quatro grandes eventos: recalque inicial; deformação e ruptura; deslizamento das lamelas; e saída do cavaco.

Para entendê-las melhor, tem-se que o Recalque inicial: trata-se da pressão de parte do cavaco contra a superfície de saída da ferramenta. Deformação e Ruptura: a ruptura ocorre após uma sucessão de deformação elástica seguida de uma deformação plástica, levando ao cisalhamento frágil ou dúctil, dependendo das propriedades do material. Deslizamento de lamelas: após a ruptura parcial ou completa na região do cisalhamento, o cavaco formado pode permanecer muito ou pouco unido ao material rompido, originando cavacos contínuos ou descontínuos, a depender da união entre essas lamelas. Saída do cavaco: o movimento entre ferramenta e peça gera um escorregamento entre o cavaco e a

superfície de saída da ferramenta, essa ação ocorrendo ciclicamente provoca o surgimento de uma zona de cisalhamento secundário.

A Figura 8 mostra uma simplificação do mecanismo de formação de cavacos.

Figura 8 – Mecanismo de formação de cavaco



(MARKOPOULOS, 2013)

Esses cavacos podem ser classificados como contínuos, descontínuos (ou de ruptura) e segmentados (ou de cisalhamento), dependendo de parâmetros de usinagem e propriedades do material. Conforme estudado e explanado por Gama (2014), os três tipos caracterizam-se pelas seguintes características.

Os cavacos contínuos são caracterizados por terem grande comprimento, ou seja, cavacos que não se quebram com facilidade. Geralmente são formados a partir do torneamento de materiais dúcteis, isto é, materiais que sofrem maiores deformações antes da ruptura, com pequenos avanços e altas velocidades de corte. Por se romperem apenas com certo comprimento a distinção das lamelas não é tão nítida. Esse tipo de cavaco pode emaranhar-se na peça e na ferramenta, gerando dificuldades na operação e na lubrificação da peça.

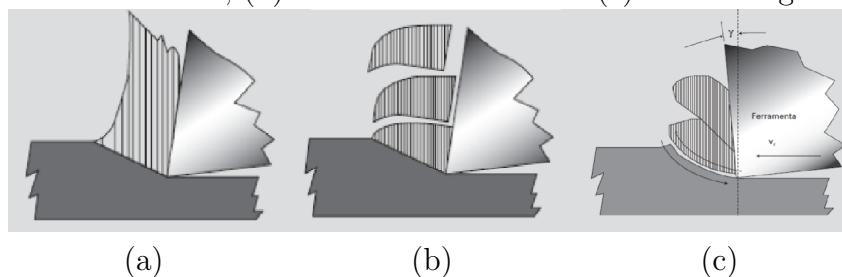
Já os cavacos descontínuos tendem a ser formados em materiais frágeis, no qual ocorre menos deformação para a ruptura, contudo também podem ser gerados em outros materiais usinados com baixa velocidade de corte, pequeno ângulo de saída e grande avanços. Ele possui certas vantagens visto que longos cavacos podem gerar travamentos, riscamento e outras dificuldades na usinagem, sendo preferido em relação ao cavaco contínuo.

Por fim, os cavacos segmentados são gerados por grandes deformações nas intercalações entre altas e baixas bandas com quase nenhuma deformação em seus interiores.

Isso provoca um aumento do amolecimento localizado, gerado pelas altas temperaturas concentradas, formando cavacos na forma de dentes de serra. Nela há uma distinção das lamelas justapostas, por isso chamados cavacos segmentados.

Uma ilustração dos três tipos de cavacos pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 – Tipos de cavaco  
(a) Cavaco contínuo; (b) Cavaco descontínuo e (c) Cavaco segmentado



(MACHADO *et al.*, 2009)

### 2.3 Tipos de ferramenta

Além dos parâmetros de usinagem, outro fator que influencia na performance da operação é a geometria da pastilha. Para isso existem diversos insertos para diferentes aplicações, e são normalizados pela norma ISO 1832:2017 (2017). Nesta norma as pastilhas são divididas conforme os tipos mais comuns para o torneamento. A escolha da ferramenta é dada com base no material da peça, tipo de cavaco, tipo de operação de torneamento (desbaste ou acabamento), sua forma, comprimento de aresta, raio ponta e outros fatores.

Primeiramente, o código do inserto é dado pelo formato da pastilha, podendo ser quadrada, triangular, trigon, entre outras. Essa geometria tem influencia devido à resistência aos esforços sofridos pelo processo de corte, variando suas angulações. No catálogo da Sumitomo (2024), exposto na Figura 10, é possível observar os tipos de insertos oferecidas pela empresa.

Figura 10 – Formato do inserto

Symbol	Insert Shape	Apex Angle
<b>C</b>		80°
<b>D</b>		Diamond type
<b>E</b>		
<b>F</b>		
<b>V</b>		
<b>R</b>		Round type
<b>S</b>		Square type
<b>T</b>		Triangular type
<b>W</b>		Trigon type
<b>A</b>		Parallelogram type
<b>B</b>		
<b>K</b>		
<b>H</b>		Hexagonal type
<b>O</b>		Octagonal type
<b>P</b>		Pentagonal type
<b>L</b>		Rectangular type
<b>M</b>		Diamond type

(SUMITOMO, 2024)

Em seguida são diferenciados as pastilhas por ângulo de folga, com valores de 0° a 30°. Após, é a indicação das tolerâncias dimensionais do inserto, podendo atender a tolerâncias mais abertas ou fechado, de acordo com o inserto. O quarto valor mostrado no código é o formato da seção transversal, conforme mostrado na Figura 11.








Figura 11 – Formato da seção transversal do inserto

Symbol	Insert Hole	Hole Style	Chipbreaker	Shape (Cross Section)	Symbol	Insert Hole	Hole Style	Chipbreaker	Shape (Cross Section)
<b>N</b>			No		<b>A</b>			No	
<b>R</b>	No	No	One Face		<b>M</b>	Yes	Cylindrical	One Face	
<b>F</b>			Double-sided		<b>G</b>			Double-sided	
<b>W</b>	Yes	Straight hole + Single chamfer (40° to 60°)	No		<b>B</b>	Yes	Straight hole + Single chamfer (70° to 90°)	No	
<b>T</b>			One Face		<b>H</b>			One Face	
<b>Q</b>	Yes	Straight hole + Double chamfer (40° to 60°)	No		<b>C</b>	Yes	Straight hole + Double chamfer (70° to 90°)	No	
<b>U</b>			Double-sided		<b>J</b>			Double-sided	
					<b>X</b>	-	-	-	Special

(SUMITOMO, 2024)

O comprimento da aresta de corte é o próximo critério a ser analisado. Esse valor é importante para o processo de usinagem pois relaciona-se com a profundidade de usinagem da peça, interferindo no desgaste da ferramenta e qualidade do corte. A tabela dada pelo fabricante com essa dimensão é dada na Figura 12.

Figura 12 – Comprimento de aresta de corte

Shape	Symbol	Cutting Edge Length		Shape	Symbol	Cutting Edge Length		Shape	Symbol	Cutting Edge Length		Inscribed Circle			
		Negative	Positive			Negative	Positive			Negative	Positive				
<b>C</b> 80° Diamond type 	03	3.55	3.50	<b>D</b> 55° Diamond type 	07	7.7	6.35	<b>W</b> Trigon type 	03	3.8		5.56			
	04	4.97	4.30		09	9.7	7.94		04	4.3		6.35			
	06	6.4	6.35		11	11.6	9.525		05	5.4		7.94			
	08	8.0	7.94		15	15.5	12.70		06	6.5	3.2	9.525	3.97		
	09	9.7	9.525		19	19.4	15.875		08	8.7	4.6	12.70	4.76		
	12	12.9	12.70		<b>V</b> 35° Diamond type 	08	8.3		4.76	11		4.3		6.35	
	16	16.1	15.875			09	9.7		5.56	16	6.5		9.525		
	19	19.3	19.05			11	11.1		6.35	10	8.0		8.0		
	25	25.8	25.4			16	16.6		9.525	12	10.0		10.0		
						22	22.1		12.7	12	12.0		12.0		
			<b>T</b> Triangular type 	06		6.9	3.97	12	12.70		12.70				
<b>S</b> Square type 	S7	7.14		7.14		08	8.2	4.76	15	15.875		15.875			
	07	7.94		7.94		09	9.6	5.56	16	16.0		16.0			
	09	9.525		9.525		11	11.0	6.35	19	19.05		19.05			
	12	12.70		12.70		13	13.7	7.94	20	20.0		20.0			
	15	15.875		15.875	16	16.5	9.525	24	24.0		24.0				
	19	19.05		19.05	22	22.0	12.70	25	25.0		25.0				
	25	25.40		25.40	27	27.5	15.875	25	25.40		25.40				
	31	31.75		31.75	33	33.0	19.05	32	32.0		32.0				
					<b>R</b> Round type 				08	8.0		8.0			
								10	10.0		10.0				
							12	12.0		12.0					
							15	15.875		15.875					
							16	16.0		16.0					
							19	19.05		19.05					
							20	20.0		20.0					
							24	24.0		24.0					
							25	25.0		25.0					
							25	25.40		25.40					

(SUMITOMO, 2024)

O sexto parâmetro é a espessura da pastilha, fator relacionado a rigidez e estabilidade da pastilha. O seguinte é o raio de ponta da ferramenta, fator importante para a qualidade do acabamento superficial da peça. E o último, sendo este dado de acordo com cada fabricante, não exigido por normas, é o quebra-cavaco, que diferencia-se para determinadas aplicações, sendo acabamento leve, desbaste, entre outros. A tabela exemplificando os tipos de quebra-cavaco é mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Quebra-cavaco

Symbol	Applications	3D type (Bumpy type)	Standard	Handed type	Other Specials	
F□	Fine Finishing to Finishing	FA, FL, FE, FF, FB, FC, FK, FP		FT, FX, FZ FYS,FY, FW	Wide Chipbreaker	W
S□ L□	Light Cutting	SE, SEW, SI, SC, SF, SS, SU, SX LU, LUW, LB		SD SDW ST	Double Positive Chipbreaker	GX
G□ U□	General Machining	GE, GU, GUW UG, UP US, UX	GZ UZ	UM	For Chamfering	C
M□	Roughing	MP, MU, MX, ME	MC	MM HM	For Round type Inserts	RD, RP, RX, RH
H□	Heavy Cutting	HG, HP, HF	HU HW		For Exotic Alloy Turning	EF, EG, EX, EM
					For Aluminum Alloy Turning	AW, AG, AX, AY, LD, GD
					For Hardened Steel Turning	FV, LV, GH
					For Carburised Layer Removal	SV
					For Stainless Steel Turning	EF, EG, EM

(SUMITOMO, 2024)

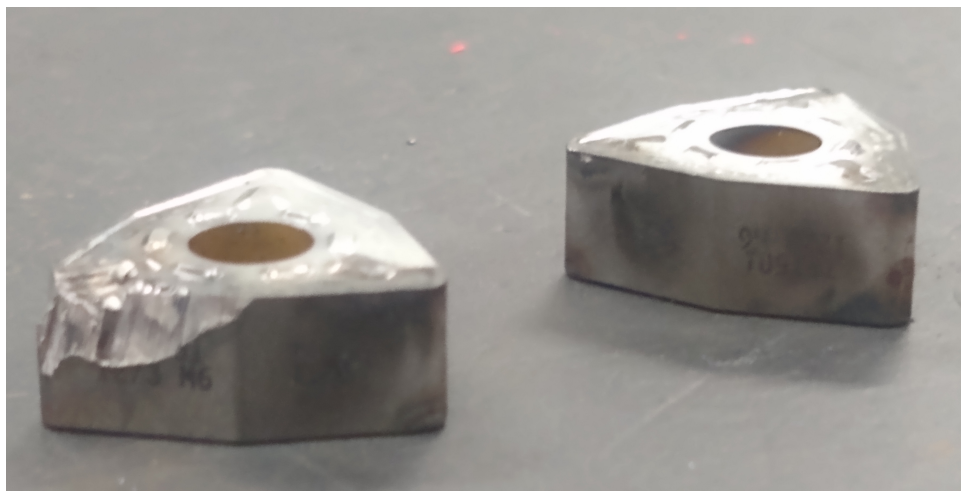
## 2.4 Tipos de desgaste de ferramenta

Em um processo de torneamento a perfeita condição da ferramenta de corte é primordial para a boa qualidade da peça. Pastilhas com defeitos e alterações em seu formato e dimensões nominais geram dimensões fora da tolerância, má qualidade superficial, riscamento da peça e, em casos mais extremos, a perda da peça.

Segundo Machado *et al.* (2009), três principais fenômenos são os causadores destes problemas: avaria, desgaste e deformação plástica. O primeiro fenômeno trata-se da destruição da pastilha de forma abrupta; o desgaste é o resultado da perda gradual de material, alterando sua forma original; e a deformação plástica é a mudança da geometria da aresta de corte devido ao deslocamento de material. Em muitos casos a literatura classifica este fenômeno como desgaste, então, para este estudo, assim será adotado.

A avaria trata-se de uma quebra, lascamento ou trinca repentina e inesperada da ferramenta. A quebra e o lascamento leva à destruição total ou parcial da pastilha, comumente em ferramentas de baixa tenacidade (cerâmicas e ultraduros). Já a trinca ocorre em metais duros e cermets, devido a maior tenacidade destes materiais, não havendo uma destruição da pastilha. Um caso de pastilha quebrada por avaria pode ser observada na Figura 14, no qual, houve um impacto da máquina causada por erro no programa de usinagem.

Figura 14 – Pastilha quebrado por impacto na máquina



Próprio autor (2025)

O desgaste da ferramenta é o principal causador de troca de ferramenta, ainda que a ferramenta apresente alta tenacidade, evitando a avaria, sempre estará sujeita ao desgaste. De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2014), três são as principais áreas de desgaste de uma pastilha: desgaste de cratera, desgaste de flanco e desgaste de entalhe.

O desgaste de cratera ocorre na superfície de saída da ferramenta a altas velocidades de corte, o que gera um aumento de temperatura na região, favorecendo o mecanismo de desgaste. Devido à redução da resistência a abrasão gerado, o desgaste à abrasão é favorecido, formando então uma cratera alongada com as extremidades arredondadas nas regiões que sofrem tensões, isto é, paralela à aresta de corte na superfície de saída da ferramenta (AMORIM, 2002). O desgaste de cratera pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Desgaste de cratera



(SANDVIK, 2024)

O desgaste de flanco ocorre nas superfícies de folga, atingindo a aresta principal

e/ou secundária de corte. Este desgaste pode causar vibrações na ferramenta e na peça, e apresenta-se como o problema mais crítico, pois leva a uma maior exigência da potência de corte. Se a aresta principal se desgastar há um aumento de temperatura e de força no corte, interferindo em risco de danos à peça. Já caso seja na aresta secundária, o desgaste gera a perdas de controle dimensional e de qualidade no acabamento superficial da peça. Devido a estes motivos é o principal ponto a ser analisado em critérios de fim de vida útil da ferramenta (AMORIM, 2002). Um exemplo de desgaste de flanco é mostrado na Figura 16.

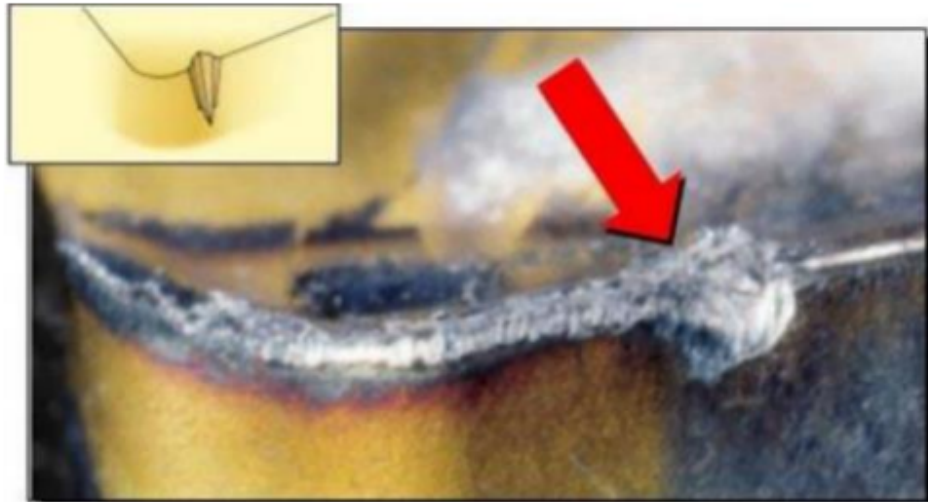
Figura 16 – Desgaste de flanco



(SANDVIK, 2024)

O desgaste de entalhe ocorre nas arestas da ferramenta, entre o flanco e a superfície de saída. Este problema é resultado da ação das rebarbas produzidas nas bordas do cavaco endurecidas, devido ao maior encruamento desta região, ao promover alta aderência com a pastilha. Esse contato gera um arrancamento de parte do material, podendo levar, com o aumento progressivo do entalhe, a quebra da ferramenta de corte, assim como uma piora do acabamento superficial (AMORIM, 2002). Uma ilustração do desgaste de entalhe é mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Desgaste de entalhe



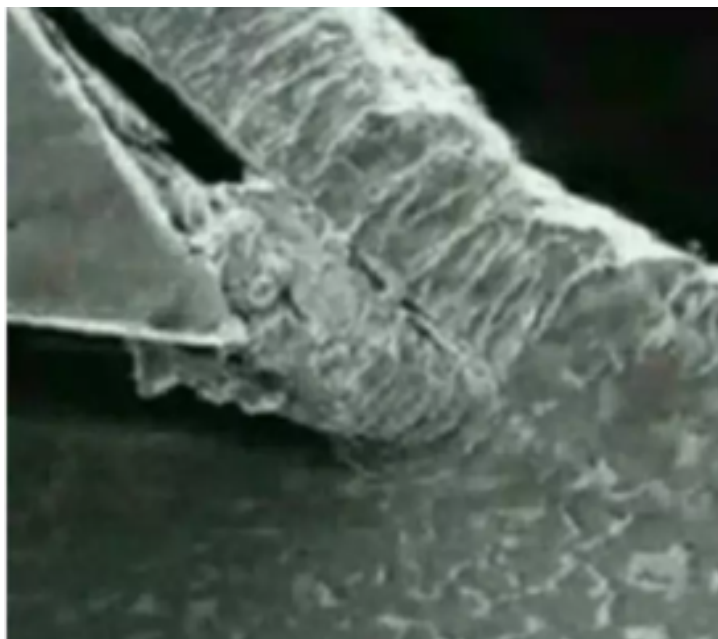
(SANDVIK, 2024)

## 2.5 Causas geradoras de desgaste

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2014), cinco fenômenos são os principais causadores dos desgaste de ferramenta: aresta postiça de corte, abrasão mecânica, aderência, difusão e oxidação.

A aresta postiça de corte pode se formar na superfície de contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta em baixas velocidades de corte, no qual devido a pressão de corte na zona de aderência, o cavaco pode se soldar à ferramenta. Esse cavaco então pode se deformar e encruar, aumentando sua resistência e criando uma aresta postiça de corte. Esta camada cresce gradativamente, com a repetição deste processo, até que eventualmente se quebra, desgastando parte frontal da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). Uma imagem com aresta postiça de corte pode ser observada na Figura 18.

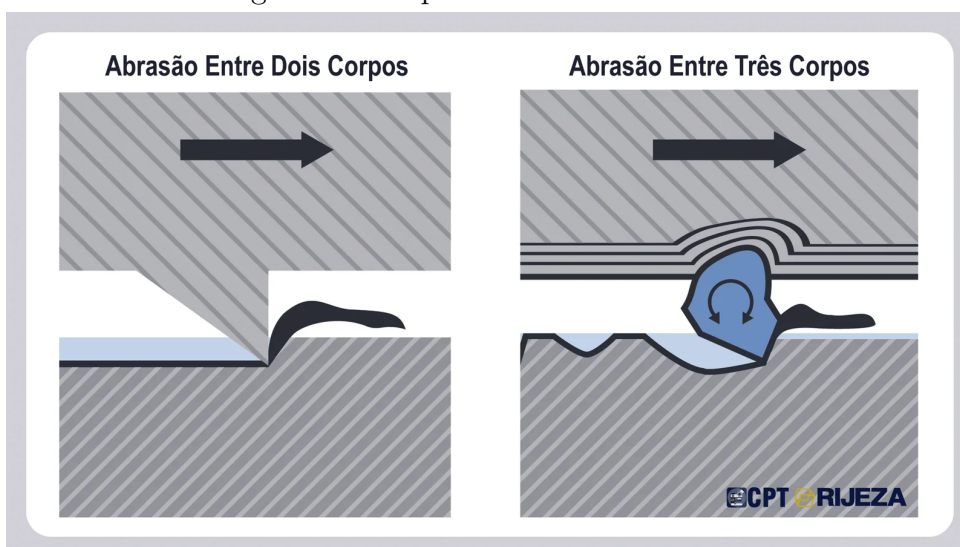
Figura 18 – Formação de aresta postiça de corte



(BALZERS, 2024)

Outro fenômeno que causa desgaste da ferramenta é a abrasão mecânica. Ela é gerada pelo atrito da superfície de folga com a peça, e da superfície de saída com o cavaco. Este atrito, intensificado pelas partículas duras na peça e a temperatura gerada no corte, vai desgastando a pastilha gerando desgaste frontal e por cratera. Quanto maior a dureza a quente da ferramenta, maior será a resistência a este fenômeno (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). Uma imagem mostrando o desgaste por abrasão é ilustrado na Figura 19.

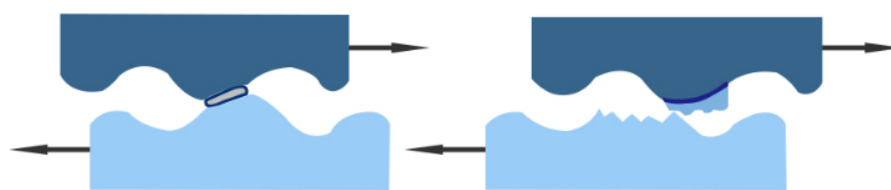
Figura 19 – Tipos de abrasão mecânica



(RIJEZACPT, 2024)

O desgaste por aderência ocorre quando duas superfícies metálicas são colocadas em contato sob baixa temperatura e velocidade de corte. Nestas condições pode formar-se um extrato metálico, provocando aderência, que ao tentar separar-lhes ocorre a ruptura de um dos metais. Este fenômeno também está presente na aresta postiça de corte, porém pode ocorrer mesmo sem a formação da aresta postiça de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). Uma imagem que pode ilustrar o desgaste por aderência é mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Desgaste por aderência



(LILYBEARING, 2024)

Outro fator que gera desgaste da ferramenta é o desgaste por difusão. Este fenômeno é microscopicamente ativado pela temperatura na zona de corte, proveniente da alta velocidade de corte. A depender desta temperatura, da duração do contato e da afinidade química entre os materiais pode ocorrer a difusão dos átomos de ferro do aço do cavaco para a ferramenta. O contrário, isto é, difusão dos átomos da ferramenta para o cavaco também ocorre porém com volume de desgaste muito pequeno (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Por fim, o desgaste por oxidação também pode gerar desgaste na ferramenta de corte. A oxidação ocorre devido à presença de ar e água, presentes nos fluidos de corte, em contato com os metais em altas temperaturas. Após a formação destes óxidos eles se desgastam facilmente gerando desgastes na ferramenta. O principal ponto de ocorrência deste fenômeno situa-se nas extremidades de contato entre cavaco e ferramenta, onde possui mais ar, facilitando também o desgaste de entalhe (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

É praticamente impossível quantificar a contribuição de cada fenômeno para o desgaste da pastilha, mas é possível afirmar que o desgaste de flanco é causado prioritariamente por abrasão mecânica e pela aresta postiça de corte. Já o desgaste de cratera devido principalmente pela difusão; enquanto o desgaste de entalhe é gerado pela aderência e à oxidação. Ademais, é possível avaliar que altas velocidades de corte o desgaste é causado por abrasão mecânica, difusão e oxidação, fenômenos relacionados ao aumento da temperatura. Enquanto em baixas velocidades de corte intensifica-se o desgaste de aderência e de cisalhamento por aresta postiça de corte.

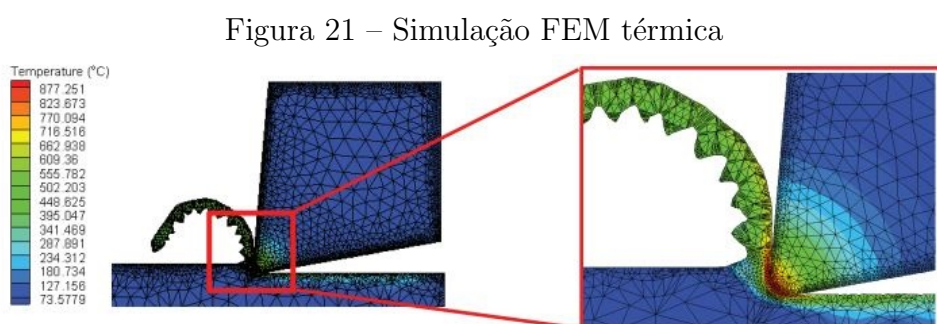
## 2.6 Modelo de elementos finitos (simulação térmica e estrutural)

A simulação pelo método de elementos finitos é uma ferramenta muito útil para fazer diversas simulações e previsões do comportamento de um corpo solicitado térmico ou mecanicamente. Através do software NX 12 Siemens é possível fazer simulações FEM de tensão-deformação, de temperatura, hidrodinâmica, termo-elástica, entre outras que permitem estudar o desempenho de um sistema.

Para toda simulação FEM alguns passos devem ser realizados a fim de preparar o sistema para efetuar os cálculos, e após, dar as condições para simular da maneira mais semelhante às condições reais. Inicialmente, para preparar o sistema, é necessário sempre fazer a modelagem das malhas do objeto, que serão os elementos no qual serão usados para calcular os resultados, também deve-se estabelecer o material a ser trabalhado, especificando as principais propriedades, de forma a tornar a simulação mais fiel ao modelo real.

Após, devem ser colocadas as condições no qual o sistema está submetido. Então primeiramente, adicionar a aplicação das cargas existentes no sistema, isto é, forças, potências, temperaturas; as condições de contorno, ou seja, os valores definidos para o sistema computacional (graus de liberdade, perdas de temperatura por convecção, perda por radiação); e as configurações da simulação, definindo o tipo de simulação e resultado que deseja-se obter. Como todos esses parâmetros incluídos deve-se rodar a simulação, assim finalizando a simulação e obtendo os resultados.

A Figura 21 ilustra uma aplicação da simulação FEM para simular a temperatura na interface ferramenta-cavaco em um processo de torneamento.



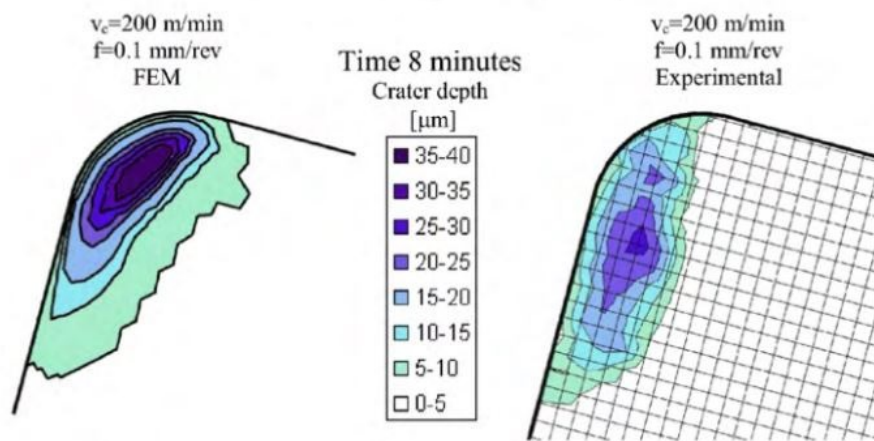
(EMIR; ÖZDEMIR; BAHÇE, 2024)

Como resultados desta simulação ilustrada na Figura 21 foram obtidas as temperaturas na ferramenta e no cavaco para determinado instante de tempo da simulação, também seria possível fazer para cada instante de tempo e observar o aumento de temperaturas no qual há um aumento de potência. Ademais, com este estudo, pode-se analisar as regiões exatas de desgaste geradas pelo processo, relacionando a simulação com os estudos presentes na literatura sobre desgaste de entalhe, de cratera e de flanco. Desta forma,

concluindo quais variáveis responsáveis por gerar cada tipo de desgaste e seus principais fenômenos consequentes.

Um estudo com simulação FEM mostrando um desgaste de cratera pode ser observado na Figura 22.

Figura 22 – Simulação FEM de desgaste de cratera



(ATTANASIO *et al.*, 2010)

### 3 METODOLOGIA

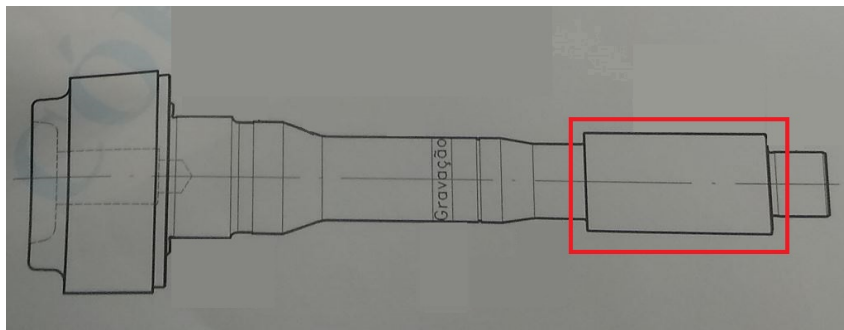
Nesta seção serão descritas os materiais e os métodos utilizados no trabalho para determinar as tensões térmicas no inserto provenientes do torneamento de um eixo de transmissão de um caminhão. Serão apresentados os parâmetros de usinagem, propriedades dos materiais da peça e ferramenta e condições de usinagem. Ademais, serão descritas as simulações térmica e termoelástica realizadas visando compará-las com a literatura existente.

#### 3.1 Especificações do sistema analisado

##### 3.1.1 Peça usinada

Para realizar a análise foi simulado o torneamento de um eixo piloto de transmissão de caminhão realizado por uma empresa automotiva no interior do estado de São Paulo. Para a simulação foi reduzido o trecho de estudo para uma região específica da peça no qual o tempo de operação e demais parâmetros são conhecidos. O desenho do eixo, evidenciando a região mencionada, pode ser observado na Figura 23.

Figura 23 – Região de estudo do eixo de transmissão



Próprio autor (2025)

O material da peça é o 25Mo4Cr, um aço estrutural de liga usado para engrenagens e eixos em diversos setores. Possui boa resistência a escoamento, à tração e valores de plasticidade e tenacidade suficientes para sua aplicação. Também tem alta resistência a corrosão e ao calor, validando seu uso no setor automotivo. Uma tabela com sua composição (em porcentagem) pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do 25Mo4Cr

Carbono (C)	Manganês (Mn)	Silicone (Si)	Molibdênio (Mo)	Cromo (Cr)
Mín: 0,23	Mín: 0,60	Mín: 0,15	Mín: 0,40	Mín: 0,40
Máx: 0,29	Máx: 0,90	Máx: 0,40	Máx: 0,50	Máx: 0,60

(PAULY-STÄHLHANDEL, 2025)

### 3.1.2 Inserto e porta-ferramenta

A ferramenta usada foi o WNMG080616-M5 TP2501 da SECO, ou seja, um inserto do tipo trigon com ângulo de ponta  $80^\circ$  e raio de ponta de 1.6mm (SECO-TOOLS, 2025a). O porta-ferramenta tem o código PWLNL 2525 M08 da SECO usado para pastilha do tipo W (trigon) e com ângulo de posição de  $95^\circ$  (SECO-TOOLS, 2025b). O inserto e o porta-ferramenta podem ser observados nas Figuras 24 e 25.

Figura 24 – Caixa do inserto utilizado



Próprio autor (2025)

Figura 25 – Porta-ferramenta posicionado na máquina



Próprio autor (2025)

O inserto utilizado é um Carboneto de Tungstênio com Cobalto (WC-Co), portanto classificado como um metal duro. Este metal apresenta alta resistência ao desgaste, elevada tenacidade e resistência ao impacto, características importantes para sua aplicação de desbaste na operação de torneamento. Além destes atributos, o metal duro pode trabalhar em grandes temperaturas chegando a faixa de até 1200 °C em processos de grande atrito ferramenta-cavaco (MOLINARI; NOUARI, 2002).

Para fazer as simulações são necessárias algumas propriedades termo-mecânicas deste metal. Estes dados são colocados como entrada no software e a partir de seus valores há a geração de resultados. As propriedades necessárias para realizar as simulações, bem como seus valores para o metal duro (WC-Co) estão mostradas na Tabela 2.

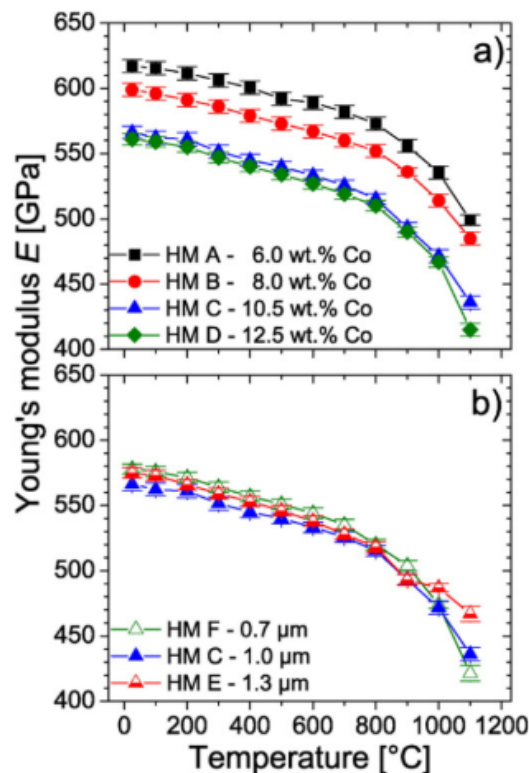
Tabela 2 – Propriedades do metal duro (WC-Co)

Propriedade	Valor	Unidade
Densidade ( $\rho$ )	15,7	$\text{g/cm}^3$
Módulo de Elasticidade (E)	Tabela 11	GPa
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,2	-
Coefficiente de Dilatação Térmica ( $\alpha$ )	$5,75 \cdot 10^{-6}$	$/^\circ\text{C}$
Condutividade Térmica ( $\lambda$ )	Tabela 12	$\text{W/m}^\circ\text{C}$
Calor Específico (c)	Tabela 13	$\text{J/kg}^\circ\text{C}$

(TEPPERNEGG *et al.*, 2016) e (KAZYMYROVYCH; KRYZHANIVSKYY, 2023)

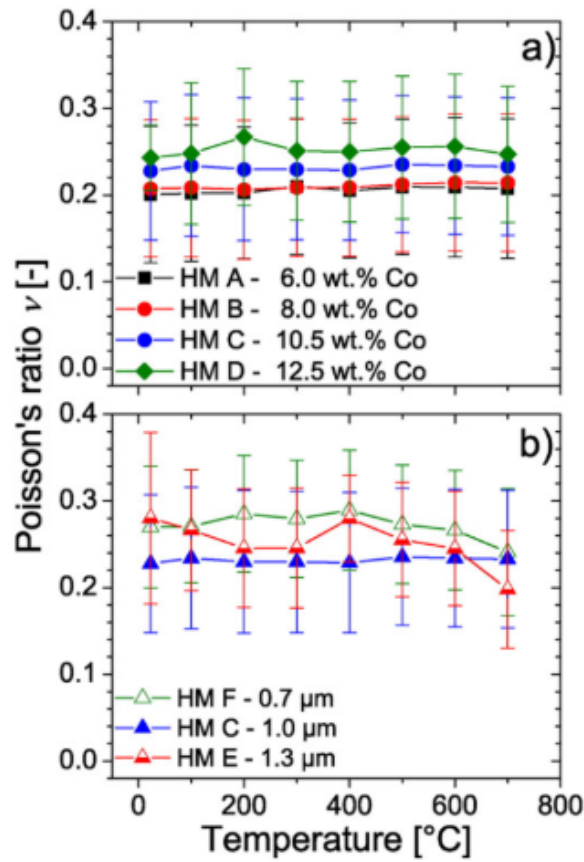
Algumas destas propriedades variam de acordo com a quantidade de cobalto presente na liga, além de variar com a temperatura. Para isso, para obter estas curvas foi analisado o metal duro com 6,0% Co (curva HM A - 6.0 wt.% Co), utilizando o estudo de Teppernegg *et al.* (2016) e Kazymyrovych e Kryzhanivskyy (2023) como referências. Nas Figuras 26, 27, 28 e 29 mostram as curvas de módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, condutividade térmica e calor específico, respectivamente, em função da temperatura para cada porcentagem de cobalto. Os valores inseridos no programa computacional são expostos no tópico seguinte.

Figura 26 – Gráfico de Módulo de Young do WC-Co em função da temperatura



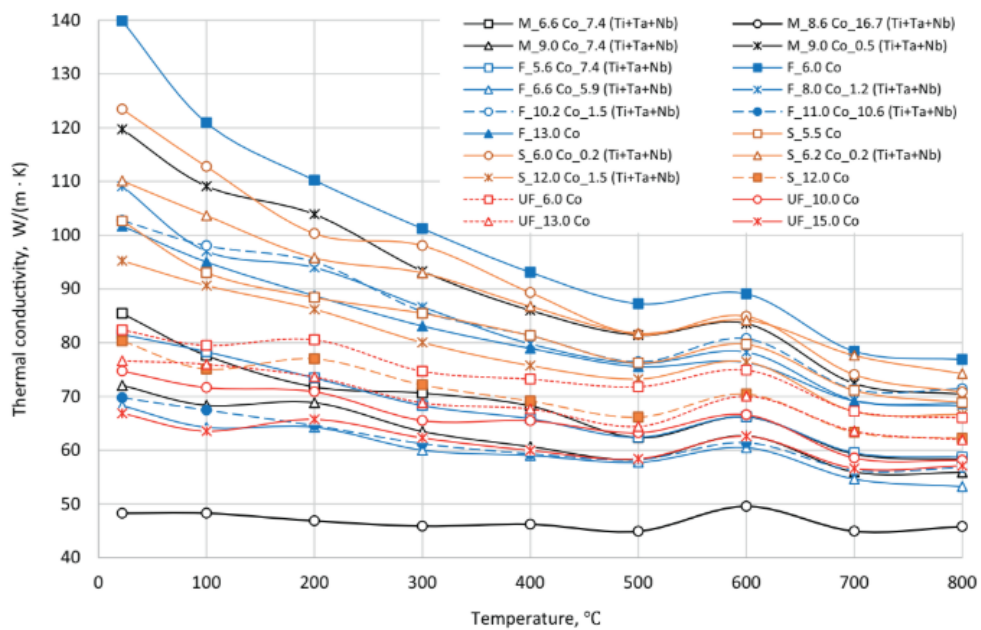
(TEPPERNEGG *et al.*, 2016)

Figura 27 – Gráfico do coeficiente de Poisson do WC-Co em função da temperatura



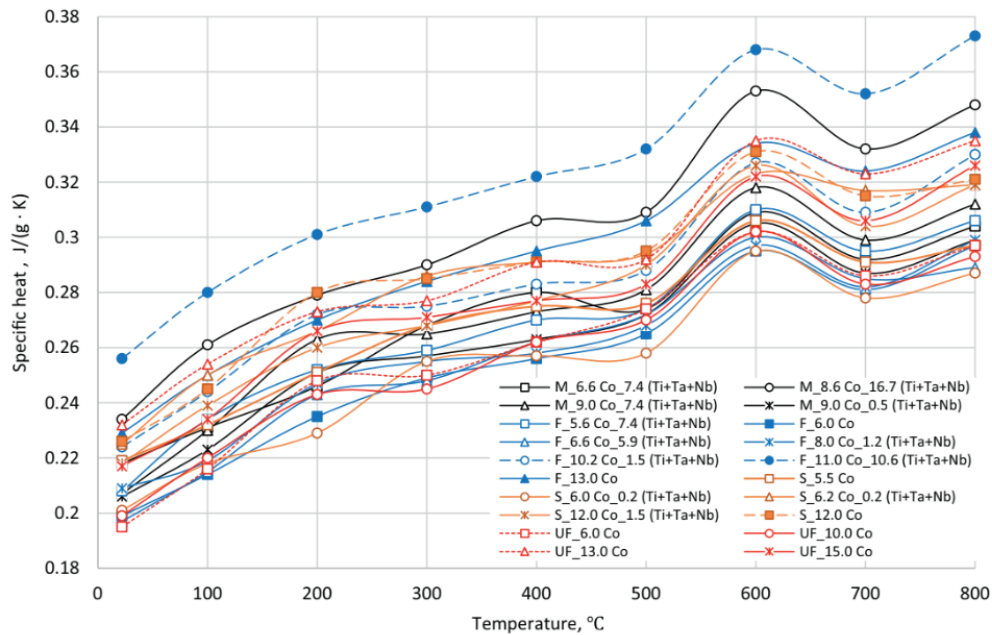
(TEPPERNEGG *et al.*, 2016)

Figura 28 – Gráfico da condutividade térmica do WC-Co em função da temperatura



(KAZYMYROVYCH; KRYZHANIVSKYY, 2023)

Figura 29 – Gráfico do calor específico do WC-Co em função da temperatura

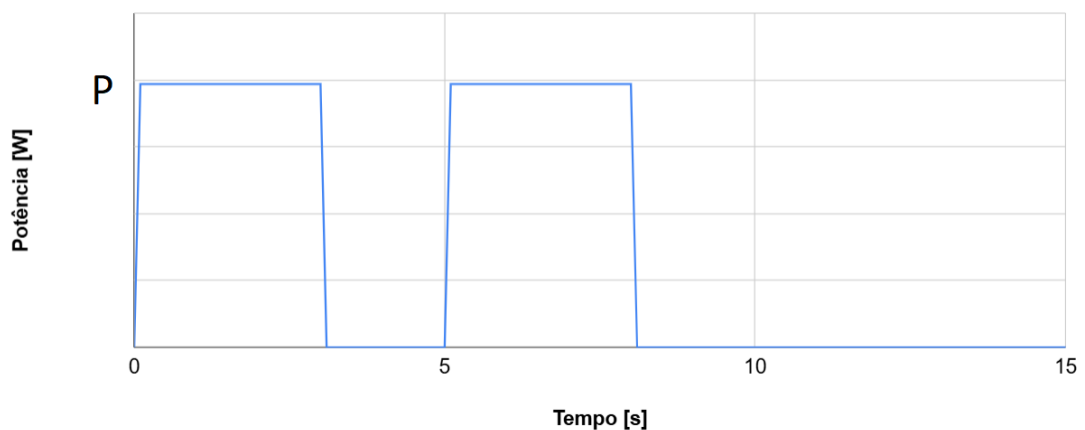


(KAZYMYROVYCH; KRYZHANIVSKYY, 2023)

### 3.1.3 Condições de usinagem

O torneamento do trecho a ser estudado ocorre em 2 passes, devido a grande quantidade de material a ser removido para atingir a dimensão requerida. Ao acionar a máquina o inserto toca na peça, iniciando o desbaste, após realizar o primeiro passe a ferramenta sobe, sem contato com o eixo, e retorna à posição inicial para realizar mais um passe. Um gráfico ilustrando o comportamento da potência aplicada no eixo pode ser observado na Figura 30.

Figura 30 – Gráfico da potência aplicada no torneamento



Próprio autor (2025)

Os valores dos diâmetros do forjado e do usinado são mostrados na Tabela 3, enquanto os parâmetros de usinagem são dados na Tabela 4.

Tabela 3 – Diâmetro inicial e final do eixo

<b>Diâmetro do forjado</b>	<b>Diâmetro do usinado</b>
∅ 37,0 mm	∅ 30,0 mm

Próprio autor (2025)

Tabela 4 – Parâmetros de usinagem utilizados

<b>Parâmetros de usinagem</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Profundidade de corte ( $a_p$ )	1,75	mm
Avanço ( $f_n$ )	0,45	mm/rev
Rotação ( $n$ )	200	rev/min
Velocidade de corte ( $v_c$ ) - 1ª simulação	23,24	m/min
Velocidade de corte ( $v_c$ ) - 2ª simulação	18,85	m/min

Próprio autor (2025)

#### 3.1.4 Cavaco gerado

O cavaco resultante da operação é do tipo contínuo com dimensões médias calculadas através da medição de cinco filetes de cavacos diferentes, em comprimento de 175 mm e espessura 1,40 mm, valores utilizados para cálculo de comprimento de contato ferramenta-cavaco ( $l_c$ ), apresentado no tópico seguinte. Uma figura com o cavaco gerado pode ser visto na Figura 31.

Figura 31 – Formato do cavaco gerado

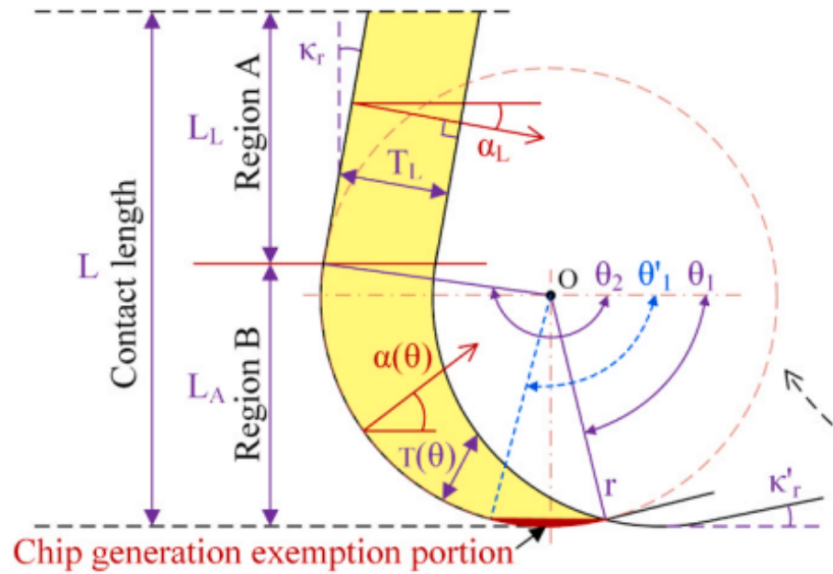


Próprio autor (2025)

### 3.1.5 Comprimento de contato ferramenta-cavaco ( $l_c$ )

No processo de torneamento há a remoção de material da peça por uma ferramenta cortante ao ser aplicada rotação na peça e avanço na ferramenta. Contudo não é todo o inserto que toca o eixo para fazer o desbaste mas sim apenas uma área de contato ferramenta-cavaco. Segundo estudo de Zhang *et al.* (2024), o comprimento desta região na direção perpendicular ao avanço é dada pelo comprimento de contato ferramenta-cavaco ( $l_c$ ), denominado dimensão L pelo autor, conforme pode ser observado na Figura 32.

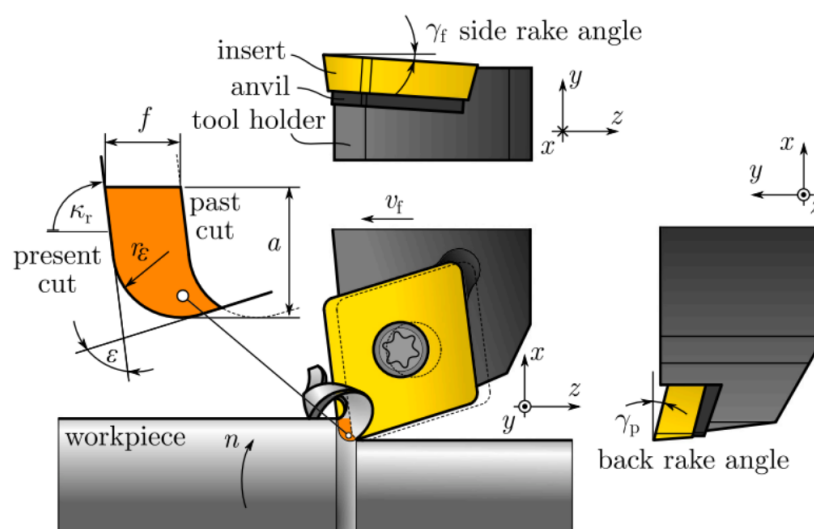
Figura 32 – Região de contato ferramenta-cavaco



(ZHANG *et al.*, 2024)

Outros estudos sobre esta região focal de corte foi realizado por Hajdu *et al.* (2023), no qual mais detalhes da geometria da região são obtidos, para torneamento ortogonal, tais como o comprimento na direção do avanço, medido pelo avanço da ferramenta. Essas dimensões serão usadas como referência para determinar a região de contato ferramenta-cavaco. Todas as dimensões da região são observadas na Figura 33.

Figura 33 – Dimensões da região de contato ferramenta-cavaco



(HAJDU *et al.*, 2023)

Todas as dimensões da região são conhecidas, com exceção do comprimento de contato ferramenta-cavaco ( $l_c$ ). Para isso, foi adotado o estudo do autor Astakhov (2010),

em sua obra “*Geometry of Single-point Turning Tools and Drills - Fundamentals and Practical Applications*” como referência para calcular este valor.

O valor do comprimento de contato ferramenta-cavaco é dado por:

$$l_c = t_{1T} \zeta^{1,5} \quad [mm] \quad \text{com} \quad (3)$$

$$\zeta = \frac{t_2}{t_1} = \frac{v}{v_1} \quad (4)$$

$$t_1 = f_n \sin \kappa_r \quad (5)$$

No qual:

- $t_{1T}$  é a espessura real do cavaco não cortado [mm];
- $\zeta$  é a taxa de compressão do cavaco [-];
- $t_1$  é a espessura do cavaco não cortado [mm];
- $t_2$  é a espessura do cavaco (medida experimentalmente) [mm];
- $f_n$  é o avanço [mm/rev];
- $\kappa_r$  é o ângulo de posição da ferramenta [°].

Para o cálculo da espessura real do cavaco não cortado deve-se fazer um cálculo para verificação para determinar qual equação deve ser utilizada. As equações de verificações são dadas por:

$$a_p \geq r_n (1 - \cos \kappa_r) \quad (6)$$

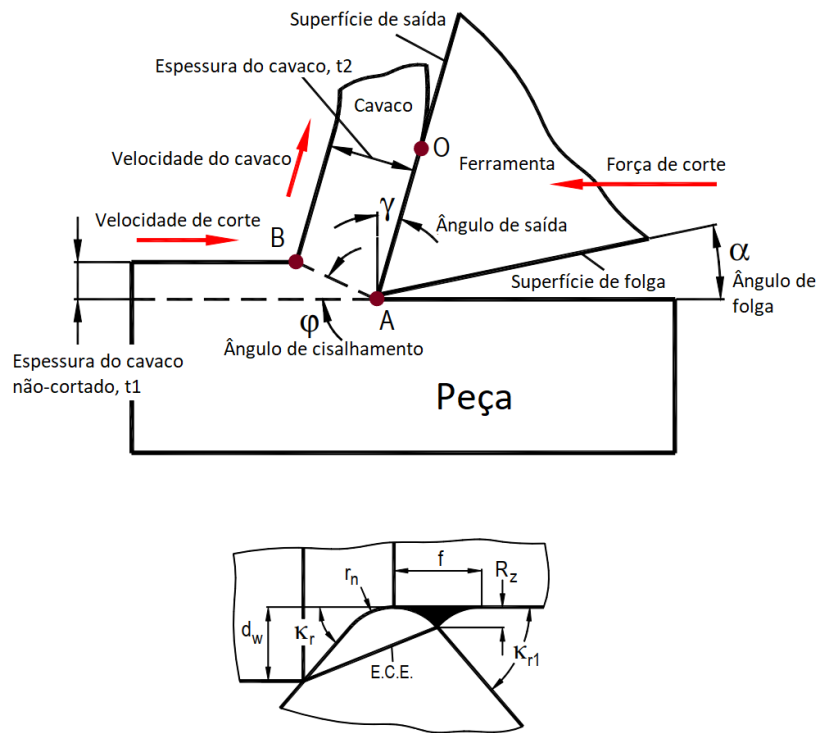
$$f_n \leq 2r_n \sin \kappa_{r1} \quad (7)$$

No qual:

- $a_p$  é a profundidade de corte [mm];
- $r_n$  é o raio de ponta da ferramenta [mm];
- $\kappa_{r1}$  é o ângulo de posição da ferramenta [°].

A Figura 34 mostra uma representação de todas as dimensões e ângulos existentes na operação.

Figura 34 – Parâmetros de corte



(ASTAKHOV, 2010)

Caso satisfaça ambas condições, então o valor desejado é dado por:

$$t_{1T} = \frac{f_n}{c_1} \sin \arctan \frac{c_1}{[1 - e_1(1 - \cos \kappa_r)] \cot \kappa_r + e_1(\sin \kappa_r + g_1)} \quad \text{com} \quad (8)$$

$$c_1 = 1 - e_1 \left( 1 - \sqrt{1 - g_1^2} \right) \quad (9)$$

$$e_1 = \frac{r_n}{t_1} \quad (10)$$

$$g_1 = \frac{f_n}{2r_n} \quad (11)$$

No qual:

- $c_1$ ,  $e_1$  e  $g_1$  são variáveis calculadas conforme equações acima [-].

Portanto, com os valores de entrada já medidos no sistema experimental, têm-se pela Tabela 5.

Tabela 5 – Valores experimentais dos parâmetros de usinagem e de corte

<b>Grandeza</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Profundidade de corte ( $a_p$ )	1,75	mm
Avanço ( $f_n$ )	0,45	mm/rev
Ângulo de posição ( $\kappa_r$ )	95	°
Ângulo de posição ( $\kappa_{r1}$ )	95	°
Raio de ponta ( $r_n$ )	1,6	mm
Espessura do cavaco ( $t_2$ )	1,40	mm

Próprio autor (2025)

Desta forma, as equações de verificação podem ser calculadas e mostradas na Tabela 6.

Tabela 6 – Equações de verificação

<b>Equação</b>	<b>Valor</b>	<b>Satisfaz a equação?</b>
$a_p$	1,75	$a_p \geq r_n(1 - \cos \kappa_r)$
$r_n(1 - \cos \kappa_r)$	1,7394	<b>OK</b>
$f_n$	0,45	$f_n \leq 2r_n \sin \kappa_{r1}$
$2r_n \sin \kappa_{r1}$	3,188	<b>OK</b>

Próprio autor (2025)

Como as equações de verificação foram satisfeitas pode-se utilizar as equações para cálculo de  $t_{1T}$ , e conseqüentemente, o valor do comprimento de contato ferramenta-cavaco. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores para cálculo de  $l_c$  segundo Astakhov (2010)

<b>Grandeza</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Espessura do cavaco não cortado ( $t_1$ )	0,448	mm
$e_1$	0,914	-
$g_1$	0,141	-
$c_1$	0,991	-
Real espessura do cavaco não cortado ( $t_{1T}$ )	0,313	mm
Taxa de compressão do cavaco ( $\zeta$ )	3,123	-
<b>Comprimento de contato ferramenta-cavaco (<math>l_c</math>)</b>	<b>1,730</b>	<b>mm</b>

Próprio autor (2025)

A fim de validar a formulação proposta por Astakhov (2010) foi-se comparada com outras equações estudadas e presentes na literatura. Segundo estudo de Iqbal, Mativenga e Sheikh (2008), a depender do material da peça existem diversas formas de calcular este

parâmetro. Uma tabela com todas as formulações propostas pelo autor pode ser observada na Figura 35.

Figura 35 – Conjunto de equações para cálculo de  $l_c$

Researcher	Contact length model	Workpiece material (cutting speed; m/min)
Lee and Shaffer [18]	$L_c = \frac{h_1 \sqrt{2}}{\sin \phi \sin(45^\circ + \phi - \alpha)}$	Mild steel (not specified)
Abuladze [19]	$L_c = 2h_1[\lambda(1 - \tan \alpha) + \sec \alpha]$	– <sup>a</sup>
Poletika [20]	$L_c = h_1[2.05\lambda - 0.55]$	Iron <sup>a</sup> , steel <sup>a</sup> , copper <sup>a</sup> , bronze <sup>a</sup>
Kato et al. [21], Toropov and Ko [13]	$L_c = 2h_2$	Aluminium, copper, zinc, tin-lead alloy (50), Al 6061 (1,000), Copper (800), AISI 1045 (300), AISI 304 (140)
Tay et al. [22]	$L_c = \frac{h_1 \sin \theta}{\cos \alpha \sin \phi}$	AISI 1016 (244)
Vinogradov [23]	$L_c = \frac{h_1 \sin \frac{\theta}{2}}{\sin \phi \sin(\frac{\theta}{4} + \phi - \alpha)}$	– <sup>a</sup>
Oxley [16]	$L_c = \frac{h_1 \sin \theta}{\cos \alpha \sin \phi} \left\{ 1 + \frac{C_r}{3[1+2(\frac{\theta}{4} - \phi) - nC]} \right\}$	Low carbon steel –0.16% C (6–60)
Zhang et al. [24].	$L_c = 8.677 \times 10^{-05} h_1^{0.515} V_c^{-0.065} (90^\circ - \alpha)^{0.733}$	AISI 1045 (300)
Stephenson et al. [17]	$L_c = 0.485 + 0.00280 V_c$	AISI 1018 (82)
Marinov [15]	$L_c = 1.61h_2 - 0.28h_1$	AISI 1018 (291)
Sutter [5]	$L_c = 1.92h_2 - 0.09h_1$	XC 18 (3600)

$L_c$  contact length,  $h_1$  undeformed chip thickness,  $h_2$  chip thickness,  $\lambda$  chip compression ratio,  $\alpha$  rake angle,  $\phi$  shear angle,  $V_c$  cutting velocity,  $n$  material constant,  $C$  material constant,  $\theta$  inclination of resultant cutting force to shear plane  
<sup>a</sup>Information not available

(IQBAL; MATIVENGA; SHEIKH, 2008)

Destá forma, para o eixo estudado 25MoCr4 (0,25% C) a equação de Lee e Shaffer (1951), para aços doces (0,15 a 0,30% C), torna-se mais pertinente. Fazendo os cálculos têm-se o valor do comprimento de contato ferramenta-cavaco mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores para cálculo de  $l_c$  segundo Lee e Shaffer (1951)

Grandeza	Valor	Unidade
Espessura do cavaco não deformado ( $h_1$ )	0,318	mm
Ângulo de cisalhamento ( $\phi$ )	30	°
Ângulo de saída ( $\gamma$ )	25	°
<b>Comprimento de contato ferramenta-cavaco (<math>l_c</math>)</b>	<b>1,655</b>	<b>mm</b>

Próprio autor (2025)

Comparando os resultados obtidos pela formulação de Astakhov (2010) e Lee e Shaffer (1951) obtêm-se valores muitos próximos, desta forma, reforçando a validade do resultado. Embora estes cálculos tenham validade para torneamento ortogonal, eles serão usados como base para a simulação devido à similaridade com o modelo real.

### 3.1.6 Potência aplicada na ferramenta-cavaco ( $P_{fr}$ )

Ao aplicar uma potência em um sistema, ela dissipa-se em diversos componentes. Segundo Astakhov (2010) as parcelas dessa energia total podem ser interpretadas como:

$$P_C = F_c v = P_{pd} + P_{fR} + P_{fF} + P_{ch} \quad (12)$$

No qual:

- $P_C$  é a potência total [W];
- $P_{pd}$  é a potência gasta na deformação plástica da camada que está sendo removida [W];
- $P_{fR}$  é a potência gasta na interface ferramenta-cavaco [W];
- $P_{fF}$  é a potência gasta na interface ferramenta-peça [W];
- $P_{ch}$  é a potência gasta na formação de novas superfícies [W].

Como mostrado, apenas parte desta energia é utilizada no contato ferramenta-cavaco. Para calcular essa potência deve ser utilizada a seguinte equação, conforme Astakhov (2010):

$$P_{fR} = \tau_c l_c b_{1T} \frac{v_c}{\zeta} \quad \text{com} \quad (13)$$

$$\tau_c = 0,28\sigma_{UTS} \quad (14)$$

$$v_c = \frac{\pi D_w n}{1000} \quad (15)$$

No qual:

- $\tau_c$  é a tensão de cisalhamento média no contato ferramenta-cavaco [MPa];
- $b_{1T}$  é espessura real do cavaco [mm];
- $v_c$  é a velocidade de corte [m/min];
- $\sigma_{UTS}$  é máxima resistência à tração do material de trabalho [MPa];
- $D_w$  é o diâmetro da peça [mm];
- $n$  é a rotação [rev/min].

Para calcular a espessura real do cavaco as mesmas condições da Tabela 6 devem ser satisfeitas. Caso seja validada, ela pode ser calculada por:

$$b_{1T} = \frac{c_1 a_p}{\sin \arctan \frac{c_1}{[1 - e_1(1 - \cos \kappa_r)] \cot \kappa_r + e_1(\sin \kappa_r + g_1)}} \quad (16)$$

Como as equações de verificação já foram realizadas pode-se utilizar a equação para cálculo de  $b_{1T}$ , e posteriormente, o valor da potência na região de contato ferramenta-cavaco. A Tabela 9 mostra a adição dos valores de entrada restantes e os parâmetros necessários para o cálculo da potência.

Tabela 9 – Valores para cálculo de  $P_{fR}$ 

<b>Grandeza</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Diâmetro do forjado ( $D_w$ )	37,0	mm
Rotação (n)	200	rpm
Máxima resistência à tração do material de trabalho ( $\sigma_{UTS}$ )	600	MPa
Velocidade de corte ( $v_c$ )	23,24	m/min
Tensão de cisalhamento média no contato ferramenta-cavaco ( $\tau_c$ )	168	MPa
Espessura real do cavaco ( $b_{1T}$ )	2,512	mm
<b>Potência gasta na interface ferramenta-cavaco (<math>P_{fR}</math>)</b>	<b>90,589</b>	<b>W</b>

Próprio autor (2025)

Durante a usinagem real no torno há o resfriamento da ferramenta e da peça com o uso de jato de fluido refrigerante, porém na simulação FEM não é possível adicionar fluido ao processo, sendo os resultados gerados considerando um processo a seco. Para refinar os resultados e obter um valor mais próximo do real foi então considerado um fator de correção para ajuste da potência aplicada.

Segundo estudos de Leppert (2011), houve uma redução de 18,8% na força de corte com o uso de jorro (emulsão) de fluido refrigerante em comparação com o corte a seco para avanço 0,27 mm/rev. Os parâmetros utilizados na simulação apresentam um valor de avanço um pouco maior do que o da pesquisa, porém este será utilizado como uma aproximação para este coeficiente de correção. Estimando um coeficiente de 0,8 o valor de potência corrigido é dado pela Tabela 10.

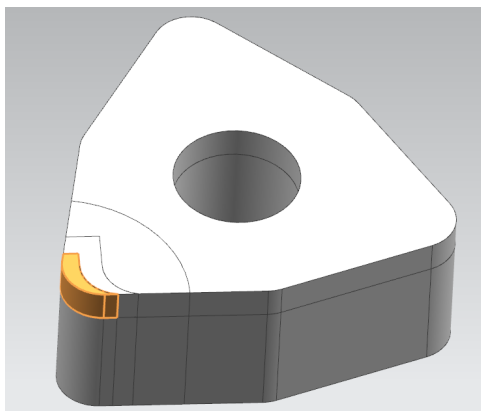
Tabela 10 – Valores para cálculo de Potência corrigida

<b>Grandeza</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Potência gasta na interface ferramenta-cavaco ( $P_{fR}$ )	90,589	W
Fator de correção de refrigeração	0,8	-
<b>Potência corrigida</b>	<b>72,471</b>	<b>W</b>

Próprio autor (2025)

Desta forma, todas as dimensões e forças presentes na região de contato ferramenta-cavaco são estabelecidas e foram utilizadas para desenhar o modelo em CAD, usado para realizar as simulações FEM. Apenas para refinar a malha foi adicionado uma área de transição entre a região de contato ferramenta-cavaco e o restante do corpo do inserto. Portanto, o modelo 3D do inserto com a região de contato ferramenta-cavaco em destaque é ilustrado na Figura 36.

Figura 36 – CAD inserto com região ferramenta-cavaco em destaque



Próprio autor (2025)

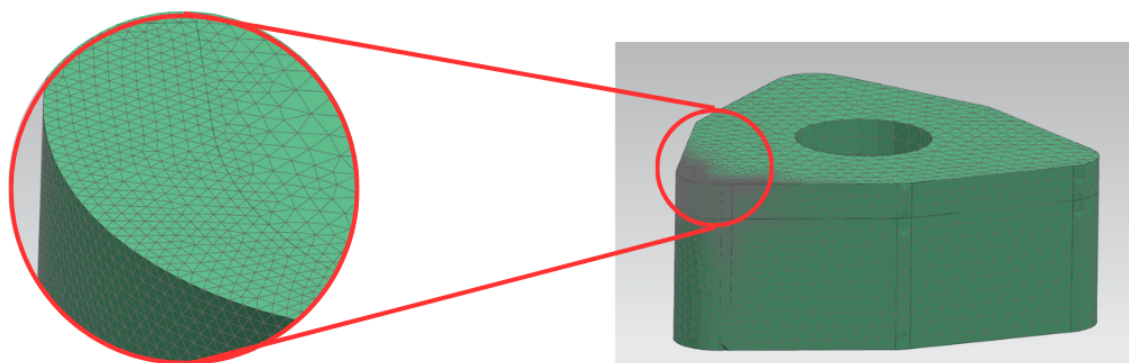
### 3.2 Simulação térmica

Para a simulação térmica transiente inicialmente foram estabelecidos parâmetros de tempo de duração, quantidade de pontos da amostra e o número de passos, além de selecionar a simulação térmica transiente como tipo de simulação a ser cumprida.

Posteriormente, foi realizada a malha da ferramenta, de forma que quanto menor os elementos da malha mais refinado o sistema e conseqüentemente melhores resultados são obtidos. Em contrapartida, mais processamento da máquina é necessário, portanto, foi realizado uma divisão da malha entre a região de contato ferramenta-cavaco, área de maior importância para o estudo devido a ser o local de aplicação de potência, e o restante da ferramenta.

A malha desenvolvida foi a 3D tetraédrica, com encaixe de malhas (*Mesh Mating*), para melhor uniformização com tamanho de elemento 0,05mm na região de contato, 0,2mm na região de transição, e 0,5mm no restante da ferramenta. Uma figura mostrando a malha, com maior refinamento da região mencionada pode ser observada na Figura 37.

Figura 37 – Malha desenvolvida para simulação



Próprio autor (2025)

Para finalizar a malha deve-se colocar todas as propriedades do material da ferramenta (metal duro WC-Co). Para isso foram incluídos os valores apresentados na Tabela 2, os valores que variam em função da temperatura foram inseridos conforme Tabelas 11, 12 e 13. Obs.: o valor do coeficiente de Poisson se mantém praticamente constante em 0,2 durante todo o tempo do gráfico (Figura 27), portanto, foi utilizado esse valor constante na simulação.

Tabela 11 – Valores de Módulo de Young utilizados na simulação

<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Módulo de Young (E) [GPa]</b>
20	620
100	615
200	610
300	605
400	600
500	590
600	585
700	575
800	570
900	560
1000	535
1100	500

Próprio autor (2025)

Tabela 12 – Valores de Condutividade térmica utilizados na simulação

<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Condutividade térmica (<math>\lambda</math>) [W/m°C]</b>
20	123
100	112
200	100
300	99
400	90
500	81
600	86
700	75
800	71

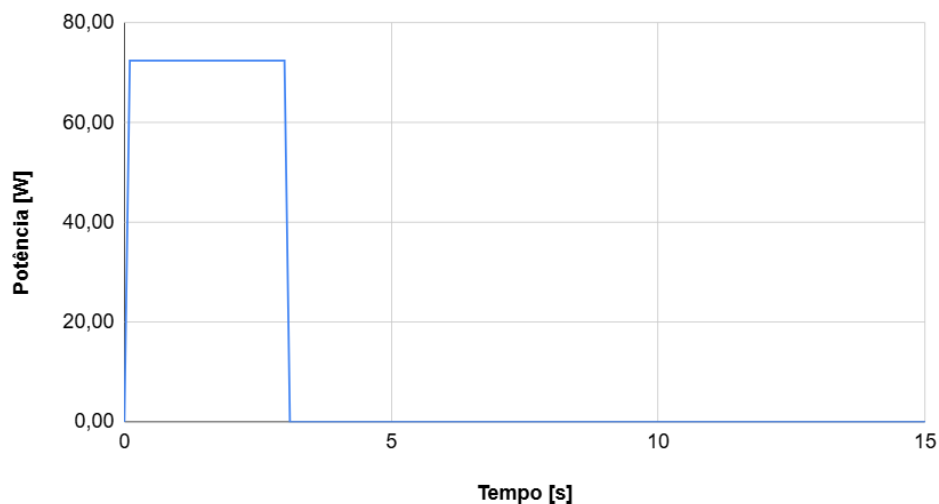
Próprio autor (2025)

Tabela 13 – Valores de Calor específico utilizados na simulação

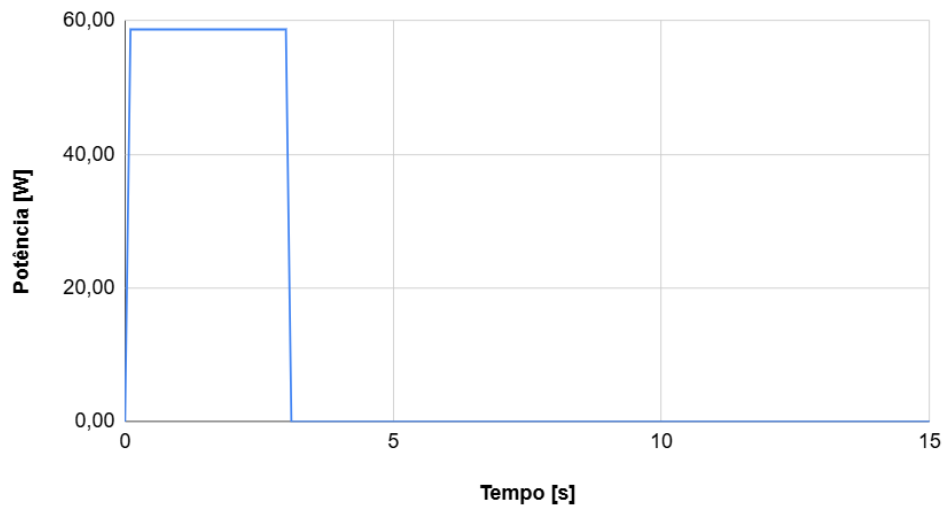
Temperatura [°C]	Calor Específico (c) [J/kg°C]
20	200
100	220
200	230
300	265
400	260
500	260
600	295
700	280
800	290

Próprio autor (2025)

O próximo passo é aplicar a potência no contato ferramenta-cavaco inserindo no software na região de interesse e com variação em função do tempo. Para a simulação apenas o primeiro passe foi representado, a fim de observar o aumento de temperatura com o corte e resfriamento do inserto após finalizada a operação. A fim de realizar uma comparação entre casos foram realizadas duas simulações: uma no começo do torneamento ( $D_w = 37$  mm) e outra no final do processo ( $D_w = 30$  mm). Desta forma, a entrada de potência ( $P_{fR}$ ) para cada situação varia conforme as Figuras 38 e 39, os pontos inseridos no software são mostrados na Tabela 14.

Figura 38 – Gráfico de potência x tempo para simulação com  $D_w = 37$  mm

Próprio autor (2025)

Figura 39 – Gráfico de potência x tempo para simulação com  $D_w = 30$  mm

Próprio autor (2025)

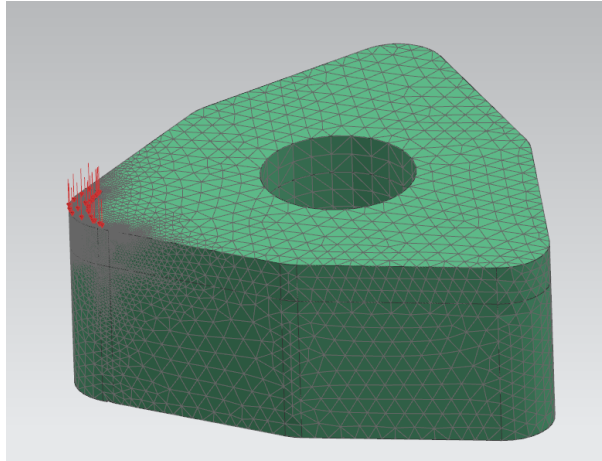
Tabela 14 – Valores de potência utilizados nas simulações

Tempo [s]	Potência ( $D_w=37\text{mm}$ ) [W]	Potência ( $D_w=30\text{mm}$ ) [W]
0	0	0
0,1	72,47	58,7
3	72,47	58,7
3,1	0	0
15	0	0

Próprio autor (2025)

Finalizando as entradas de potência no sistema deve-se aplicá-lo na região de atuação, isto é, na região de contato ferramenta-cavaco. Uma imagem mostrando como foi aplicado a potência pode ser observada a Figura 40.

Figura 40 – CAD com detalhe para região de aplicação da potência



Próprio autor (2025)

Por fim deve-se inserir os tipos de restrições, ou seja, as condições no qual o sistema perde calor. Neste caso há condução entre inserto e porta-ferramenta, nas partes no qual há contato, e convecção entre inserto e ar, nas regiões no qual não há toque na máquina. A Tabela 15 apresenta dados do coeficiente convectivo nos dois casos.

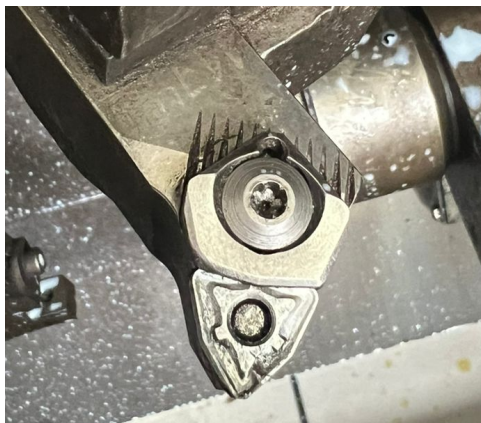
Tabela 15 – Valores de coeficiente convectivo

<b>Inserto - Porta-ferramenta</b>	<b>Inserto - Ar</b>
$20000 \text{ W/m}^2\text{K}$	$25 \text{ W/m}^2\text{K}$

Próprio autor (2025)

Uma imagem da pastilha e do porta-ferramentas posicionados em posição de usinagem, assim, ilustrando as regiões de contato, pode ser observada na Figura 41.

Figura 41 – Pastilha posicionada no porta-ferramenta



Próprio autor (2025)

Configurados todos os parâmetros, deve-se então resolver a solução no software. Desta forma gerando os resultados que serão demonstrados na próxima seção.

### 3.3 Simulação estrutural (termoelástica)

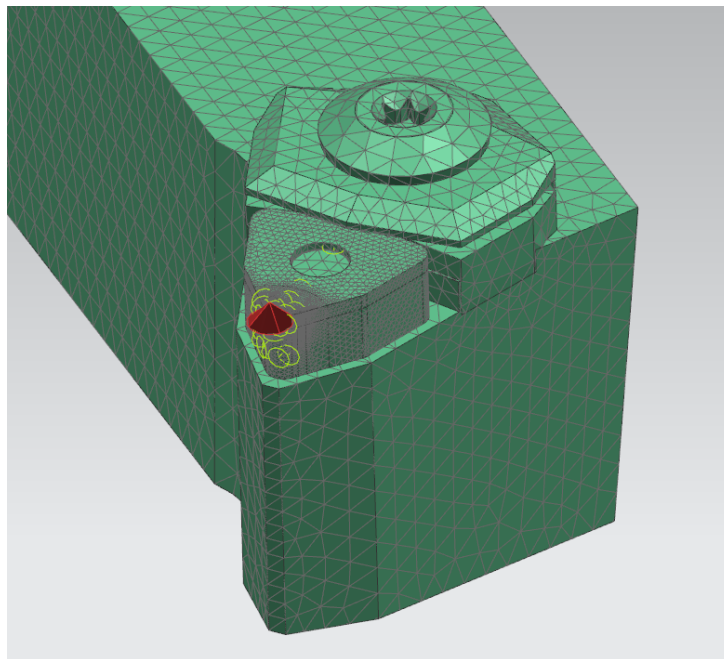
Para a simulação termoelástica será simulado para apenas um instante de tempo, visto que o objetivo deste trabalho é observar o comportamento das tensões e os desgastes gerados na ferramenta, assim, optando pela simulação estrutural permanente, em vez de uma simulação transiente.

Para isso, é necessário definir o instante de tempo da operação para o qual será simulado. No sistema estudado foi determinado o instante de tempo de três segundos pois é o último instante no qual o inserto recebe potência, após, não há mais contato com a peça. Ademais, analisando os resultados da simulação térmica, foi o instante no qual foi atingido maior valor de temperatura na ferramenta.

Para isso foi realizado um mapeamento do instante de três segundos para criar uma solução somente com os valores para esse instante de tempo. Criada essa solução, foi iniciada uma nova solução, dessa vez, uma solução estrutural usando o “Solver 101” do NX Nastran.

Primeiramente deve-se colocar os dados de carregamentos do sistema, neste caso, a entrada de temperatura. Para isso foi selecionado o arquivo com os dados de temperatura para o instante de três segundos, que foi gerado a partir da simulação térmica. A Figura 42 ilustra o sistema sendo preparado para rodar a simulação termoelástica.

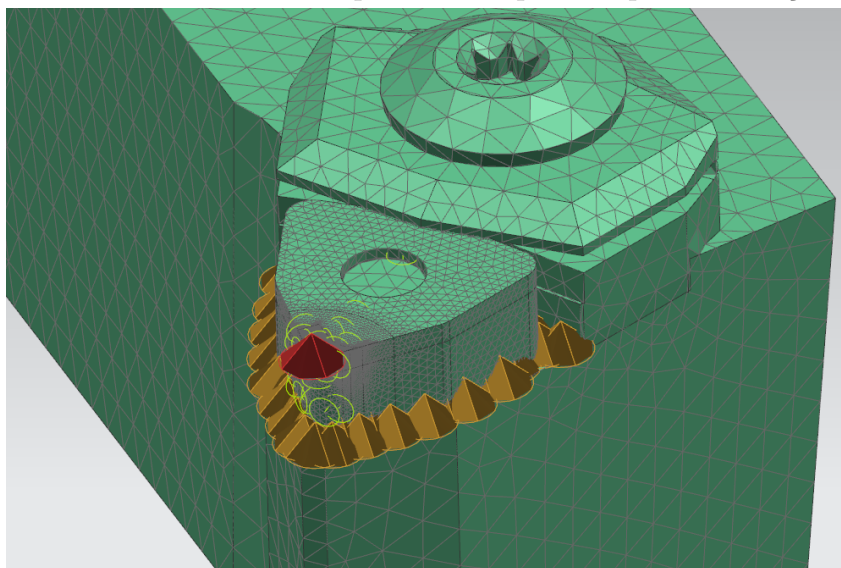
Figura 42 – Sistema com malha e potência preparadas para simulação estrutural



Próprio autor (2025)

Posteriormente, deve-se introduzir as condições de contorno definindo seus graus de liberdade, ou seja, restringir o sistema quanto a translação e rotação. Para isso foi realizado uma restrição de contato entre a face inferior do inserto e o porta-ferramenta, desta forma, não há contaminação do resultado, preservando a integridade dos resultados obtidos. Com todos os parâmetros configurados o sistema está pronto para rodar a simulação, conforme pode ser observado na Figura 43.

Figura 43 – Sistema com todos os parâmetros prontos para simulação estrutural



Próprio autor (2025)

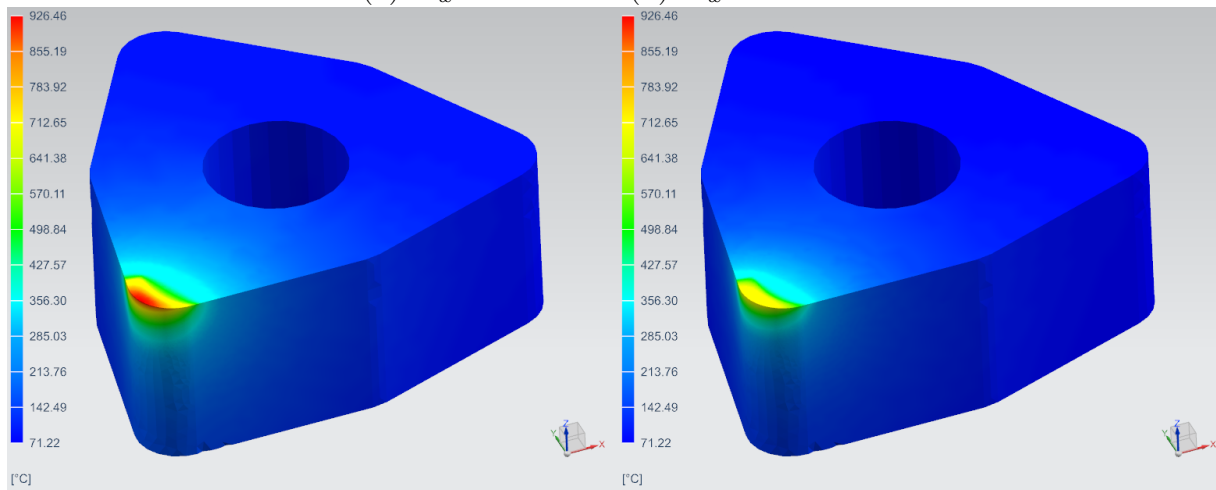
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a realização das simulações são obtidos os valores de temperatura no inserto durante o torneamento para duas velocidades de corte:  $v_c = 23,248$  m/min ( $D_w = 37$  mm) e  $v_c = 18,85$  m/min ( $D_w = 30$  mm), bem como as tensões de máximo cisalhamento na pastilha. Com estes resultados é possível fazer comparações com os estudos presentes na literatura e verificar os fenômenos de desgaste esperados para este processo.

### 4.1 Simulação térmica

Com a primeira simulação térmica ( $D_w = 37$  mm e  $v_c = 23,24$  m/min), foi obtido um valor máximo de  $T_{max} = 926,40$  °C em uma extremidade do inserto, no qual há contato com a peça. Já na segunda ( $D_w = 30$  mm e  $v_c = 18,85$  m/min), o valor máximo obtido foi de  $T_{max} = 715,03$  °C, representando um valor 22,8% menor que o primeiro devido a menor potência gerada devido ao menor diâmetro calculado, e conseqüentemente, menor velocidade de corte. Este valor está dentro do previsto pela literatura, conforme Molinari e Nouari (2002), devido ao alto atrito entre ferramenta e peça. A Figura 44 mostra a região de maior temperatura bem como sua escala de valores nas duas simulações.

Figura 44 – Simulação térmica do inserto para os dois casos  
(a)  $D_w = 37$  mm e (b)  $D_w = 30$  mm



(a)

(b)

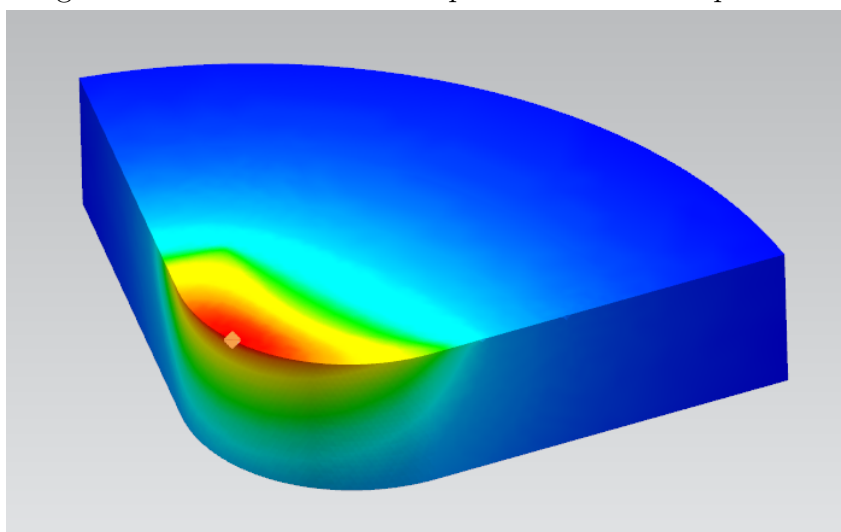
Próprio autor (2025)

Conforme esperado a temperatura atingiu seu maior valor no tempo de três segundos, pois é o último instante no qual o inserto recebe potência. Também pela análise do gráfico gerado pode-se observar o aumento da temperatura a partir do começo da simulação, devido ao início imediato do recebimento de potência ao sistema. Por fim,

é possível observar a queda de temperatura após o final do torneamento, tendo seu resfriamento quase completo com o final da operação. Comparando os gráficos é possível observar a mesma curva de temperatura alterando apenas os valores, no qual para maiores valores de velocidade de corte, e potência, há maiores temperaturas.

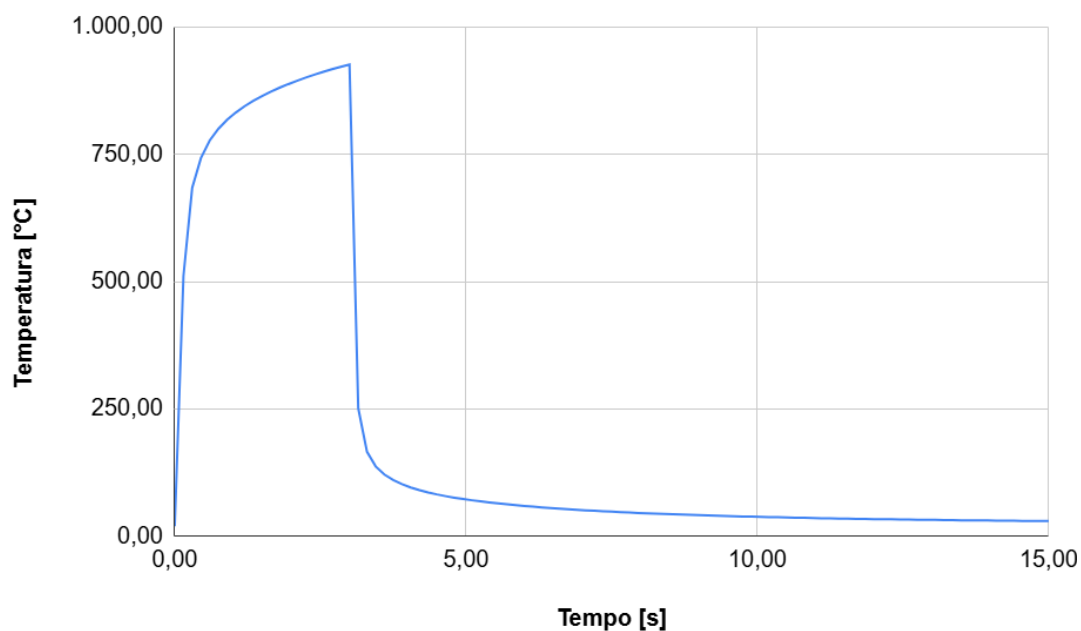
Os gráficos de temperatura ao longo do tempo de simulação são realizados a partir do ponto no qual tem maior temperatura no inserto, conforme ilustrado na Figura 45. Os gráficos são mostrados nas Figuras 46 e 47.

Figura 45 – Ponto selecionado para estudo da temperatura

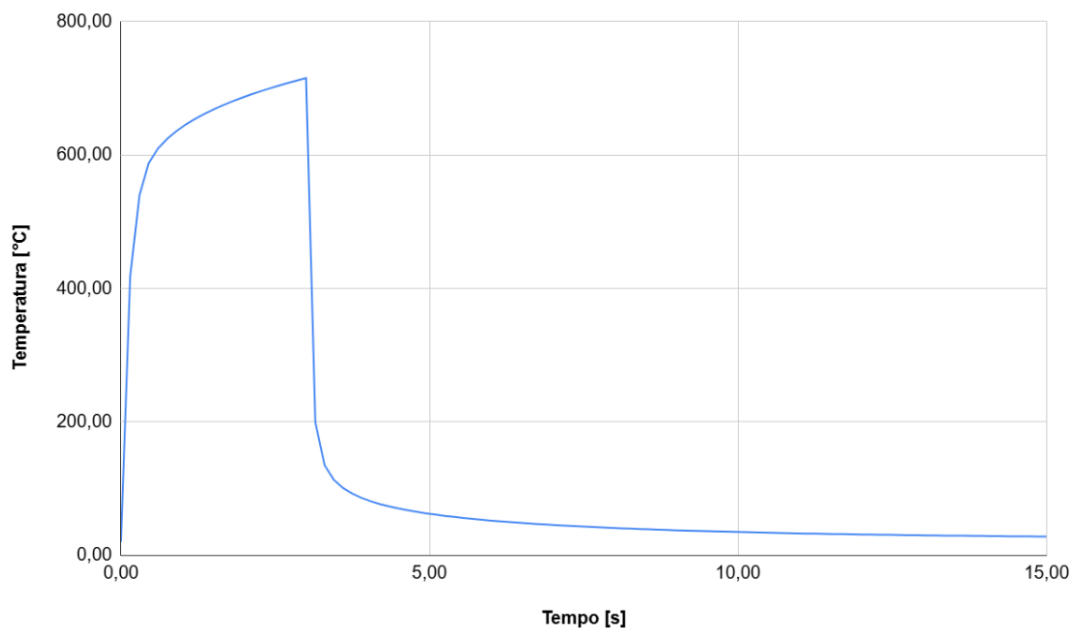


Próprio autor (2025)

Figura 46 – Gráfico de temperatura por tempo para  $D_w = 37$  mm



Próprio autor (2025)

Figura 47 – Gráfico de temperatura por tempo para  $D_w = 30$  mm

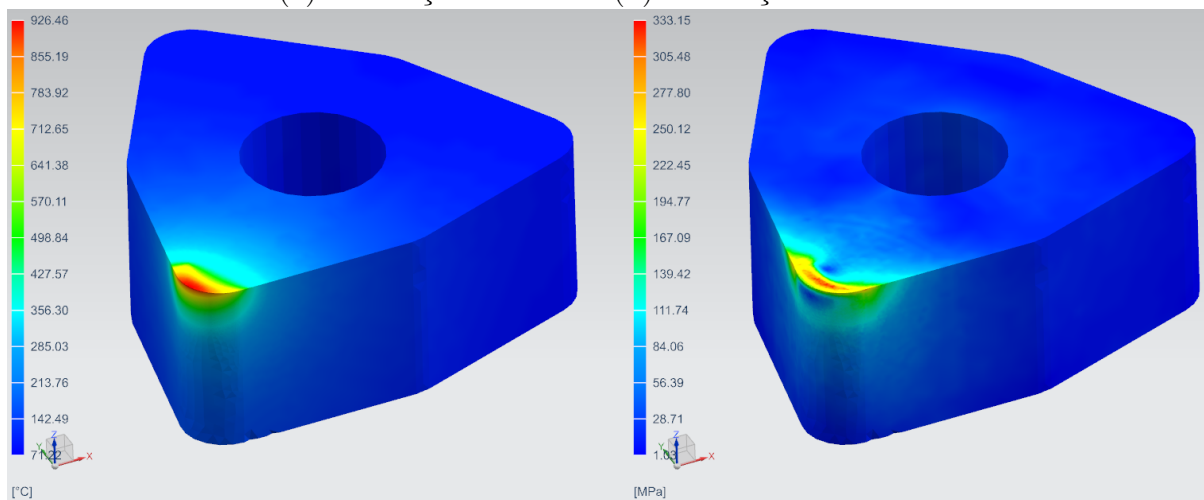
Próprio autor (2025)

#### 4.2 Simulação estrutural (termoelástica)

Para a primeira simulação estrutural ( $D_w = 37$  mm e  $v_c = 23,24$  m/min) foram obtidos resultados de tensão máxima de cisalhamento  $\tau_{max} = 333,15$  MPa, enquanto para a segunda simulação ( $D_w = 30$  mm e  $v_c = 18,85$  m/min) o valor de máxima tensão de cisalhamento foi de  $\tau_{max} = 257,71$  MPa, representando um valor 22,6% menor que o primeiro. A região de maior concentração de tensão foi a zona de contato entre ferramenta e peça, nas regiões esperadas no qual observa-se o desgaste de cratera (superfície de saída - região um pouco interior à extremidade), o desgaste de flanco (superfície de folga) e o desgaste de entalhe (aresta de corte).

As Figuras 48 e 49 ilustram os resultados das simulações termoelásticas para cada velocidade de corte estudado, comparando assim a região de maior temperatura com a de maior tensão.

Figura 48 – Comparação dos resultados das simulações para  $D_w = 37$  mm  
 (a) Simulação térmica e (b) Simulação estrutural

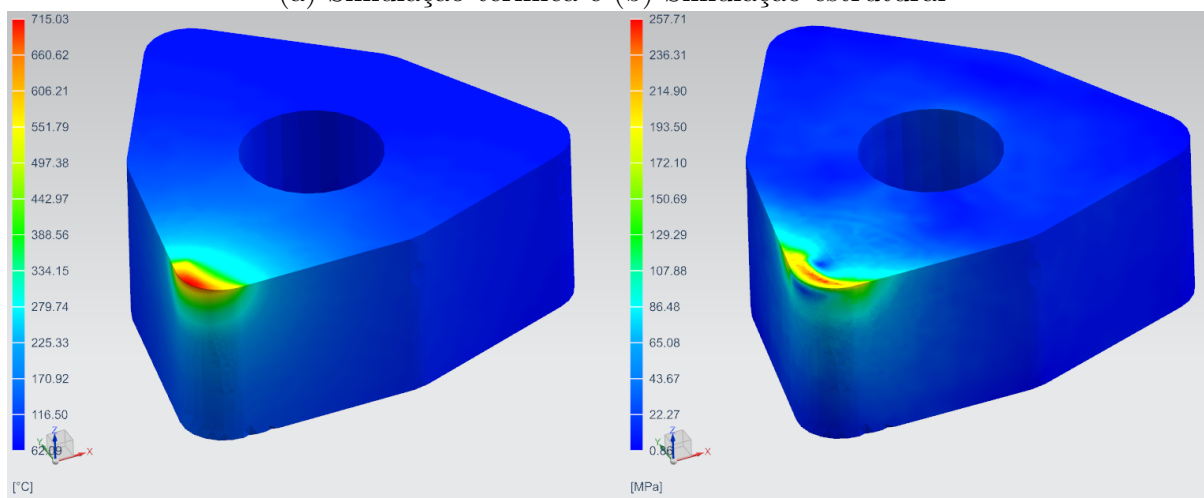


(a)

(b)

Próprio autor (2025)

Figura 49 – Comparação dos resultados das simulações para  $D_w = 30$  mm  
 (a) Simulação térmica e (b) Simulação estrutural



(a)

(b)

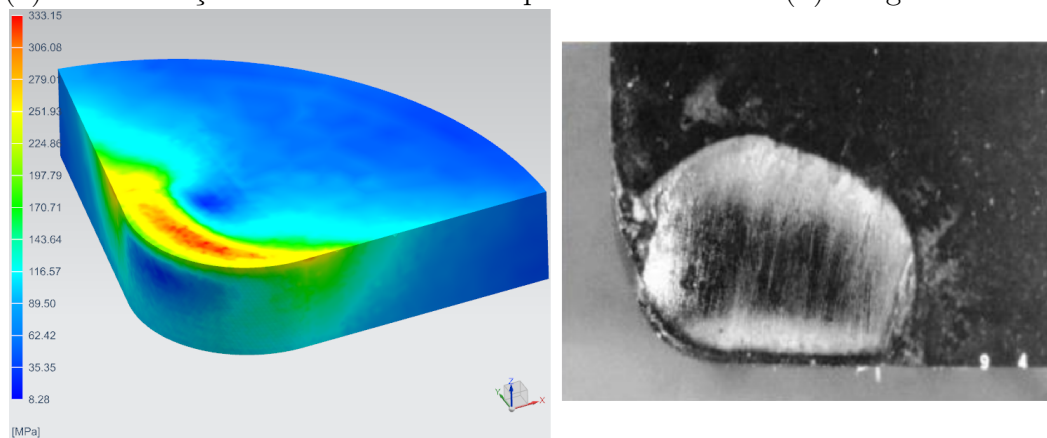
Próprio autor (2025)

Comparando os resultados obtidos na simulação com o esperado pela literatura apresentam-se concentração de tensões onde espera-se o aparecimento de desgaste por cratera, de flanco e de entalhe. Na face superior do inserto é possível observar que na região de contato ferramenta-peça possui a maior concentração de tensões, pois é a zona de aplicação de potência da ferramenta. Nesta região destaca-se uma área no qual o desgaste é intensificado, sendo descrito pela literatura como desgaste de cratera. Esse desgaste é formado sobretudo pela difusão causada pelo aumento de temperatura, o que coincide

com a região no qual há maiores temperaturas no inserto. Através da simulação é possível observar a área que pode ocorrer desgaste de cratera, região no qual há maior concentração de tensão, conforme mostrado na Figura 50.

Figura 50 – Comparação do resultado das tensões na simulação e desgaste de cratera em ferramenta

(a) Concentração de tensão na face superior do inserto e (b) Desgaste de cratera



(a)

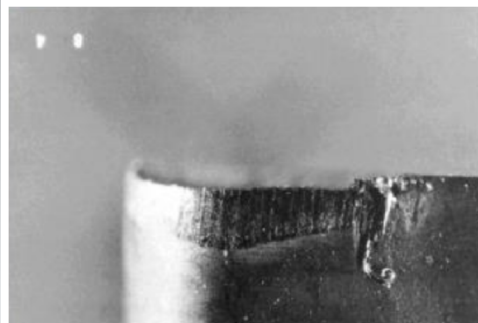
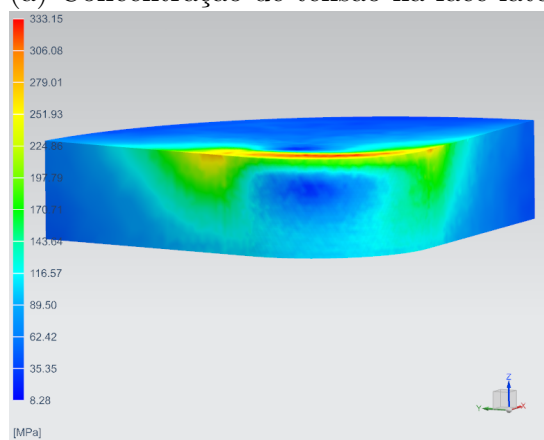
(b)

Próprio autor (2025)

Também é notório as tensões na aresta e no flanco do inserto, regiões no qual podem ser gerados os descritos desgastes de flanco e de entalhe. A intensidade das tensões nestes pontos foram menores do que as observadas na face superior, porém ainda representam valores significativos que podem gerar estes desgastes e assim gerar o fim da vida útil do inserto. A Figura 51 detalha as regiões no qual as tensões do processo podem levar ao desgaste de entalhe e o desgaste de flanco.

Figura 51 – Comparação do resultado das tensões na simulação e desgaste de entalhe e de flanco em ferramenta

(a) Concentração de tensão na face lateral e (b) Desgaste de entalhe e de flanco



(a)

(b)

Próprio autor (2025)

## 5 CONCLUSÃO

### 5.1 Trabalho presente

Com a realização deste trabalho foram estudados as tensões térmicas, isto é, as temperaturas e tensões de cisalhamento máxima, no inserto durante o processo de torneamento de um eixo de transmissão de um caminhão. Para isso foi utilizado a ferramenta das simulações pelo método dos elementos finitos (FEM) durante diferentes momentos da usinagem para avaliar os valores e os comportamentos dos resultados.

As variações da simulação consistiram na alteração da velocidade de corte do processo decorrente da variação do diâmetro do eixo estudado. Inicialmente o tarugo é usinado com diâmetro de 37 mm, enquanto no final do processo, ele atinge o valor de diâmetro de 30 mm. Desta forma, a velocidade de corte sofre uma variação no qual é máxima durante o primeiro caso, assim, acentua-se a intensidade das tensões para este caso.

Com as simulações foi possível compará-los com o esperado e estudado pela literatura. As regiões de potenciais desgastes na pastilha puderam ser observados na simulação, tais como desgaste por cratera na superfície de saída, causado pela abrasão gerada pelo atrito ferramenta-peça; desgaste de entalhe na aresta de corte e desgaste de flanco na superfície de folga, causados sobretudo por aderência e oxidação. Além disso, as regiões de maior temperatura do inserto também puderam ser estudados, sendo esta a região de contato ferramenta-peça, exatamente onde recebe potência da ferramenta.

Por fim, permite-se avançar neste trabalho para casos de simulações estruturais transientes. Neste estudo limitou-se à análise das tensões no momento de maior potência, e conseqüentemente maior temperatura, devido ao caráter de buscar o entendimento das regiões de desgaste e seu comportamento na simulação.

### 5.2 Trabalhos futuros

Em futuros trabalhos, pode-se expandir a simulação para diversos instantes de tempo para analisar este comportamento, bem como é possível variar outros parâmetros tais como profundidade de corte e avanço, ou o material do inserto e suas propriedades, realizando um comparativo entre os casos mencionados e estabelecendo as condições e materiais mais otimizados para a aplicação.

## REFERÊNCIAS

- AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, Maio 2002. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- ASTAKHOV, V. P. **Geometry of Single-point Turning Tools and Drills - Fundamentals and Practical Applications**. [S.l.]: Springer, 2010. Citado 6 vezes nas páginas , 44, 46, 47, 48 e 49.
- ATTANASIO, A. *et al.* Investigation and fem-based simulation of tool wear in turning operations with uncoated carbide tools. **Wear**, v. 269, n. 5, p. 344–350, 2010. ISSN 0043-1648. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164810001584>>. Citado na página 35.
- BALZERS. **Aresta postiça**. 2024. Acesso em: 24/11/2024. Disponível em: <[https://www.youtube.com/watch?v=xLi-9L-FT\\_s](https://www.youtube.com/watch?v=xLi-9L-FT_s)>. Citado na página 32.
- BORK, C. A. S. **Otimização de variáveis de processo para a furação do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Novembro 1995. Citado na página 19.
- DIB, M. H. M.; BENJAMIN, G. M.; JASINEVICIUS, R. G. Uma análise experimental do fresamento discordante e concordante. **Revista Iluminart**, Ano VII, n. 13, p. 113–127, 2015. ISSN 1984-8625. Citado na página 18.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. [S.l.]: Artliber Editora Ltda, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 29, 31, 32 e 33.
- EMIR, E.; ÖZDEMİR, B.; BAHÇE, E. Experimental investigation and fem analysis of chip morphology in the turning of astm f-75 cocrmo alloy. **Sigma J Eng Nat Sci**, v. 42, n. 3, p. 679–691, 2024. Citado na página 34.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. [S.l.]: Editora Blucher, 1969. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.
- GAMA, R. P. **Estudo da formação do cavaco no torneamento de superligas de níquel**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus Guaratinguetá, Fevereiro 2014. Citado na página 24.
- GROOVER, M. P. **Fundamental of Modern Manufacturing. Materials, Processes, and Systems**. [S.l.]: John Wiley Sons, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 21.
- HAJDU, D. *et al.* The curved uncut chip thickness model: A general geometric model for mechanistic cutting force predictions. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 188, p. 104019, 2023. ISSN 0890-6955. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695523000275>>. Citado na página 44.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1832:2017**: Indexable inserts for cutting tools — designation. Suíça, 2017. 12 p. Citado na página 25.

IQBAL, S.; MATIVENGA, P.; SHEIKH, M. A comparative study of the tool–chip contact length in turning of two engineering alloys for a wide range of cutting speeds. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 42, p. 30–40, 05 2008. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 48.

KAZYMYROVYCH, V.; KRYZHANIVSKYY, V. Thermal properties of cemented carbides used for metal cutting. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 111, p. 106097, 2023. ISSN 0263-4368. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436822003213>>. Citado 3 vezes nas páginas 39, 40 e 41.

LEE, E. H.; SHAFFER, B. W. The theory of plasticity applied to a problem of machining. **Journal of Applied Mechanics**, v. 18, n. 4, p. 405–413, 04 1951. ISSN 0021-8936. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.4010357>>. Citado 2 vezes nas páginas e 48.

LEPPERT, T. Effect of cooling and lubrication conditions on surface topography and turning process of c45 steel. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 2, p. 120–126, 2011. ISSN 0890-6955. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695510001902>>. Citado na página 50.

LILYBEARING. **An Overview of Bearing Wear**. 2024. Acesso em: 24/11/2024. Disponível em: <<https://www.lily-bearing.com/resources/blog/bearing-wear/>>. Citado na página 33.

MACHADO, A. R. *et al.* **Teoria da Usinagem dos Materiais**. [S.l.]: Editora Blucher, 2009. Citado 9 vezes nas páginas 15, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 25 e 28.

MARKOPOULOS, A. P. Cutting mechanics and analytical modeling. In: \_\_\_\_\_. **Finite Element Method in Machining Processes**. London: Springer London, 2013. p. 11–27. ISBN 978-1-4471-4330-7. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4330-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4330-7_2)>. Citado na página 24.

MITSUBISHI. **Função das características das ferramentas para fresamento de face. Fresamento Discordante e Concordante**. 2024. Acesso em: 20/11/2024. Disponível em: <<https://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/>>. Citado na página 19.

MOLINARI, A.; NOUARI, M. Modeling of tool wear by diffusion in metal cutting. **Wear**, v. 252, n. 1, p. 135–149, 2002. ISSN 0043-1648. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164801008584>>. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 58.

PAULY-STÄHLHANDEL. **Steel material 25MoCr4 Data Sheet**. 2025. Acesso em: 03/01/2025. Disponível em: <<https://pauly-stahlhandel.com/en/din-en/25mocr4>>. Citado na página 37.

RIJEZACPT. **Desgaste por abrasão como eliminar**. 2024. Acesso em: 24/11/2024. Disponível em: <<https://rijeza.com.br/blog/desgaste-por-abrasao-como-acontece-e-como-resolver/>>. Citado na página 32.

SANDVIK. **Wear on cutting edges**. 2024. Acesso em: 24/11/2024. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/materials/pages/wear-oncutting-edges.aspx>>. Citado 4 vezes nas páginas 23, 29, 30 e 31.

SECO-TOOLS. **Informações Técnicas Inserto WNMG080616-M5**. 2025. Acesso em: 03/01/2025. Disponível em: <<https://www.store.secotools.com/wcs/shop/ProductDisplay?storeId=10214&urlLangId=6&productId=1164838&urlRequestType=Base&langId=6&catalogId=10065>>. Citado na página 37.

SECO-TOOLS. **Informações Técnicas Porta-Ferramenta PWLNL2525M08**. 2025. Acesso em: 03/01/2025. Disponível em: <[https://www.secotools.com/article/p\\_75027465?language=pt](https://www.secotools.com/article/p_75027465?language=pt)>. Citado na página 37.

SUMITOMO. **Indexible inserts for turning**. 2024. Acesso em: 16/12/2024. Disponível em: <<https://www.sumitool.com/br/downloads/cutting-tools/general-catalog/>>. Citado 4 vezes nas páginas 25, 26, 27 e 28.

TEPPERNEGG, T. *et al.* High temperature mechanical properties of wc-co hard metals. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 56, p. 139–144, 2016. ISSN 0263-4368. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436815301517>>. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.

ZHANG, X. *et al.* Effects of chip breaker groove and tool nose radius on progressive tool wear and behavior when turning gh3536 nickel-based superalloys. **Tribology International**, v. 197, p. 109806, 2024. ISSN 0301-679X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X24005589>>. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.