



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Aeroespacial

**Simulação numérica do processo de
torneamento utilizando o Software DEFORM®
com enfoque na rugosidade**

Autor: Thais Gomes de Melo
Orientador: Prof. Rhander Viana

Brasília, DF
2022



Thais Gomes de Melo

**Simulação numérica do processo de torneamento
utilizando o Software DEFORM® com enfoque na
rugosidade**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Rhander Viana

Brasília, DF

2022

Thais Gomes de Melo

Simulação numérica do processo de torneamento utilizando o Software DEFORM® com enfoque na rugosidade/ Thais Gomes de Melo. – Brasília, DF, 2022-40 p. : il; 30 cm.

Orientador: Prof. Rhander Viana

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2022.

1. DEFORM 3D. 2. Simulação. I. Prof. Rhander Viana. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Simulação numérica do processo de torneamento utilizando o Software DEFORM® com enfoque na rugosidade

CDU 02:141:005.6

Thais Gomes de Melo

Simulação numérica do processo de torneamento utilizando o Software DEFORM® com enfoque na rugosidade

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 4 de Outubro de 2022:

Prof. Rhander Viana
Orientador

Prof. Danilo dos Santos Oliveira
Convidado 1

Prof. Paolo Gessini
Convidado 2

Brasília, DF
2022

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter me dado forças para não desistir e continuar mesmo em meio a tantas dificuldades. Em seguida, agradeço aos meus familiares que sempre me apoiaram e acreditaram que eu fosse capaz de alcançar meus sonhos. Em especial, minha mãe Lúcia e meu pai Abel, pois sem eles nada disso teria sido possível, a minha irmã Tatiany e meu cunhado Flávio que acreditam no meu sucesso mesmo quando eu não acredito.

Também agradeço às minhas amigas Maria, Beatriz e Natália que são meu conforto em dias difíceis e companheiras em todos os momentos. Ao Rafael, Guilherme e João por serem meus parceiros, torcedores e animação em todos os dias. Obrigada ainda Karina e Michael por me acolherem, fazerem parte e tornarem minha rotina mais leve e divertida.

Pelo meu crescimento profissional, agradeço a Mamutes do Cerrado, a Kraken e a Empresa Júnior Matriz. Nelas cresci, me desenvolvi e aprendi a ser a profissional que sou hoje, também vivi novas experiências e conheci amigos e colegas que me impactaram de muitas formas. Agradeço ainda aos professores, técnicos e funcionários que contribuíram para a minha formação, especialmente meu professor e orientador, Rhander Viana, que me guiou nesses últimos passos da graduação e em outros projetos com muita receptividade e tranquilidade.

Por fim, sou imensamente grata a todas as escolhas que tomei, por cada adversidade que passei e falhas que cometi, pois sem elas não teria me encontrado. Hoje sei o que quero fazer e tenho pessoas incríveis para me apoiar e me acompanhar.

Resumo

Devido a vasta aplicação industrial do alumínio, o mesmo pode ser usado desde fuselagens a cabeçotes, portanto torna-se primordial o acabamento superficial adequado para cada tipo de peça. A condição de uma superfície usinada é o resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e às vezes reações químicas. Todos esses fatores podem ter efeitos diferentes na nova superfície, assim o termo Integridade Superficial é utilizado para descrever a qualidade de uma superfície e, portanto, engloba um grande número de variações da mesma. O presente trabalho analisa os perfis de rugosidade e os valores de rugosidade média R_a de superfícies usinadas no torneamento cilíndrico externo verificando os efeitos dos principais parâmetros de usinagem, velocidade de corte (V_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p) no DEFORM 3D. O software DEFORM (*Design Environment for Forming*) utiliza do MEF (Método dos Elementos Finitos) e gera análises gráficas para o procedimento implementado. Observou-se com as simulações que o aumento da velocidade de corte não afetou significativamente o valor de R_a , enquanto o avanço foi o fator mais representativo, aumentando drasticamente a rugosidade quando aumentado e a profundidade de corte proporcionou uma influência média nessa medida.

Palavras-chaves: DEFORM 3D. Simulação. Integridade superficial. Parâmetros de corte.

Abstract

Due to the wide industrial application of aluminum, it can be used from fuselages to heads, therefore, the appropriate surface finish for each type of part is essential. The condition of a machined surface is the result of a process that involves plastic deformation, rupture, elastic recovery, heat generation, vibration, residual stresses, and sometimes chemical reactions. All of these factors can have different effects on the new surface, so the term Surface Integrity is used to describe the quality of a surface and therefore encompasses a large number of variations in the surface. The present work analyzes the roughness profiles and the average roughness values R_a surfaces machined in external cylindrical turning checking the effects of main machining parameters, cutting speed (V_c), feed (f) and depth of cut (a_p) in 3D DEFORM. DEFORM (Design Environment for Forming) software uses the FEM (Finite Element Method) and generates graphical analysis for the process implemented. It was observed with the simulations that the increase in the speed of shear did not significantly affect the value of R_a , while lead was the most representative factor, dramatically increasing roughness when increased and depth of cut provided an average influence on this measure.

Key-words: DEFORM 3D. Simulation. Surface integrity. Cutting parameters

Lista de ilustrações

Figura 1 – Ilustração do processo de torneamento, onde a ferramenta penetra na peça que está girando em torno do eixo "A"(SECCO; FILHO; OLIVEIRA, 1997).	5
Figura 2 – Principais componentes de um torno (SECCO; FILHO; OLIVEIRA, 1997).	6
Figura 3 – Principais operações realizadas no torno (MACHADO; ABRÃO; COELHO, 2015).	6
Figura 4 – Representação dos movimentos no processo de torneamento (SOUZA, 2017).	9
Figura 5 – Cunha de Corte da Ferramenta (FERRARESI, 1970).	10
Figura 6 – Arestas de corte e superfícies da cunha de corte de uma ferramenta de torno (MACHADO; ABRÃO; COELHO, 2015).	10
Figura 7 – Principais ângulos das ferramentas de corte (ELMELIGY, 2016).	11
Figura 8 – Principais grupos de materiais de ferramentas listados em ordem cronológica aproximada de surgimento (MACHADO; ABRÃO; COELHO, 2015).	13
Figura 9 – Relações entre os códigos para pastilhas e suportes (SANDVIK, 2010a).	14
Figura 10 – Características de transmissão e representação dos perfis de rugosidade e de ondulação (BECKER et al., 2012).	17
Figura 11 – Comprimento de amostragem e comprimento de avaliação (BECKER et al., 2012).	17
Figura 12 – Parâmetro de amplitude R_a (BECKER et al., 2012).	18
Figura 13 – Representação de diferentes superfícies com o mesmo valor de R_a (VALIM, 2018).	19
Figura 14 – Classificação dos acabamentos superficiais de acordo com o grau de rugosidade e o processo de usinagem (SECCO; FILHO; OLIVEIRA, 1997).	20
Figura 15 – Componentes básicos do torneamento e sua relação com o domínio de análise (DEFORM, 2010).	24
Figura 16 – Modelo de simulação e definição de parâmetros básicos de corte (DEFORM, 2010).	24
Figura 17 – Geometria da peça no domínio de análise (Autor, 2022).	26
Figura 18 – Aspecto e geometria da pastilha DNMA432 (DEFORM, 2010).	27
Figura 19 – Malha gerada para a peça de trabalho (Autor, 2022).	28
Figura 20 – Malha gerada para a ferramenta (Autor, 2022).	29

Figura 21 – Resultados obtidos para a Simulação 1 ($V_c = 250$ m/min; $a_p = 0,3$ mm; $f = 0,1$ mm/rot) (Autor, 2022).	31
Figura 22 – Resultados obtidos para a Simulação 2 ($V_c = 500$ m/min; $a_p = 0,3$ mm; $f = 0,1$ mm/rot) (Autor, 2022).	32
Figura 23 – Resultados obtidos para a Simulação 3 ($V_c = 250$ m/min; $a_p = 0,3$ mm; $f = 0,3$ mm/rot) (Autor, 2022).	32
Figura 24 – Resultados obtidos para a Simulação 4 ($V_c = 250$ m/min; $a_p = 0,5$ mm; $f = 0,1$ mm/rot) (Autor, 2022).	32
Figura 25 – Perfis de rugosidade, linha média e Ra obtidos no Excel (Autor, 2022).	33

Lista de tabelas

Tabela 1 – Valores recomendados para comprimentos de amostragem e de avaliação.	18
Tabela 2 – Propriedades mecânicas da peça.	25
Tabela 3 – Propriedades químicas do Al6061.	25
Tabela 4 – Propriedades mecânicas da ferramenta.	26
Tabela 5 – Geometria da pastilha DNMA432	27
Tabela 6 – Ângulos do porta-ferramenta DDJNR432.	27
Tabela 7 – Condições utilizadas em cada simulação	28
Tabela 8 – Características de cada simulação e valores de R_a obtidos.	33

Lista de abreviaturas e siglas

3D	Três dimensões
Al	Alumínio
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
APC	Aresta Postiça de Corte
BR	<i>Back Rake Angle</i>
CLA	<i>Center Line Average</i>
Cu	Cobre
Fe	Ferro
FEM	<i>Finite Element Method</i>
HSS	<i>High Speed Steel</i>
LME	<i>London Metal Exchange</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
Mg	Magnésio
RMS	<i>Root Mean Square Average</i>
SCEA	<i>Side Cutting Edge Angle</i>
Si	Silício
SR	<i>Side Rake Angle</i>
Ti	Titânio
WC	Carboneto de Tungstênio
Zn	Zinco

Lista de símbolos

λ_c	Comprimento de onda do filtro de perfil (mm)
ϕ	Direção de avanço
A_γ	Superfície de saída
a_p	Profundidade de corte (mm)
d	Dinâmetro de corte (m)
f	Avanço (mm/rot)
ln	Comprimento de avaliação (mm)
lr	Comprimento de amostragem (mm)
n	Rotação (RPM)
R_a	Rugosidade média aritmética (μm)
R_{max}	Altura máxima das irregularidades (μm)
R_q	Rugosidade média quadrática (μm)
r_ϵ	Raio de ponta da ferramenta (mm)
S'	Aresta secundária de corte
S	Aresta principal de corte
V_e	Velocidade efetiva de corte
V_f	Velocidade de avanço (mm/min)
V_c	Velocidade de corte (m/min)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.2.1	Objetivo Geral	2
1.2.2	Objetivos Específicos	2
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	2
2	REVISÃO TEÓRICA	3
2.1	ALUMÍNIO	3
2.1.1	Usinabilidade do alumínio	3
2.2	PROCESSO DE FABRICAÇÃO E USINAGEM	4
2.3	TORNEAMENTO	4
2.3.1	A máquina de torneiar	5
2.4	GRANDEZAS FÍSICAS NO PROCESSO DE TORNEAMENTO	7
2.4.1	Movimentos entre a peça e a aresta cortante	7
2.4.2	Direção dos movimentos	7
2.4.3	Velocidades e Profundidade de corte	8
2.5	FERRAMENTA DE CORTE	9
2.5.1	Geometria	9
2.5.2	Materiais	12
2.5.3	Escolha de ferramentas de Metal Duro	13
2.6	FORMAÇÃO DE CAVACO	14
2.7	FLUIDO DE CORTE	16
2.8	RUGOSIDADE	16
2.8.1	Vantagens e Desvantagens do parâmetro R_a	18
2.8.2	Simbologia, equivalência e processos de usinagem	19
2.8.3	Influência dos parâmetros de corte no valor da rugosidade	20
2.9	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	21
2.10	O SOFTWARE DEFORM	22
2.10.1	Pré-processador	23
2.10.2	Pós-processador	24
2.10.3	DEFORM 3D	24
3	METODOLOGIA	25
3.1	MATERIAIS DA PEÇA E DA FERRAMENTA	25
3.2	GEOMETRIA	26

3.3	CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO DAS SIMULAÇÕES	27
3.4	MALHAS E CONDIÇÕES DE CONTORNO	28
3.5	TEORIA UTILIZADA NO DEFORM	29
3.6	MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5	CONCLUSÃO	35
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	35
	REFERÊNCIAS	36
	ANEXOS	39
	ANEXO A – CHAVE DE CÓDIGO PARA PASTILHAS E SUPOR- TES	40

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a contextualização e relevância do tema abordado durante o trabalho, bem como a motivação, os objetivos gerais e específicos e a indicação de como o mesmo está organizado.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

O aumento substancial no consumo de alumínio é prova de que este metal significa na indústria moderna. O alumínio segue o ferro/aço entre os metais de maior consumo anual, sendo o mais importante dos metais não ferrosos. O alumínio é uma *commodity* global, produzido em 236 plantas localizadas em 42 países nos 5 continentes. Seu preço é referenciado pelo *London Metal Exchange* (LME) e sua produção mundial primária em 2016 totalizou 57 milhões de toneladas (ABAL, 2017).

A indústria automotiva tem investido em aplicações de alumínio desde os detalhes decorativos, como frisos, painéis e encaixes, passando pelo chassi estrutural e rodas de liga leve e até mesmo no conjunto de motorização, como cabeçote do motor e pistões. Já no setor aeronáutico, o alumínio é o material mais amplamente usado e em diferentes partes dos aparelhos, tais como asas, fuselagem, motores, trens, interiores e revestimento.

A variedade no uso do alumínio está relacionada às suas características físico-químicas, com destaque para seu baixo peso específico, boa resistência à corrosão e alta condutividade elétrica/térmica quando comparado a outros metais de grande consumo. Dessa forma, o estudo do acabamento superficial nesse material tornou-se imprescindível. A rugosidade, um dos principais critérios para especificação do acabamento superficial, é um parâmetro fundamental para descobrir se uma superfície é ideal para determinada finalidade e vem sendo cada vez mais importante à medida que cresce a precisão de ajuste entre peças a serem acopladas, nas quais somente a precisão dimensional, de forma e de posição não são suficientes para garantir a funcionalidade do par acoplado.

Tratando então da fabricação e acabamento de peças e componentes, um dos processos de fabricação mais significativos é o torneamento, realizado na máquina denominada torno. O torno é a mais antiga das máquinas-ferramenta e está na base da ciência metalúrgica visto que, devido ao seu desenvolvimento, a humanidade adquiriu as máquinas necessárias ao seu crescimento tecnológico, desde a medicina até a indústria espacial (NEVES, 2017). Nesse contexto portanto, surgiu a motivação para realização do estudo da rugosidade do alumínio no processo de torneamento apresentado nesse trabalho.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a influência dos parâmetros de corte, avanço, velocidade de corte e profundidade de corte, na rugosidade superficial média do Alumínio 6061 (Al6061) mediante simulações de torneamento utilizando o Software DEFORM.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos elencam-se:

1. Definir geometria, material e posicionamento da ferramenta de corte.
2. Especificar as configurações e condições de contorno utilizadas para as simulações no DEFORM 3D.
3. Caracterizar o processo para medição das rugosidades superficiais.
4. Analisar os resultados obtidos nas simulações.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho é dividido em 5 capítulos, sendo o primeiro este que trata dos objetivos e da contextualização do trabalho, expondo a importância do estudo do torneamento e acabamento superficial do Alumínio para a indústria.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre a usinagem e o leitor é introduzido a uma explicação dos principais parâmetros do torneamento. Ainda neste capítulo, é apresentado o conceito de rugosidade, como medi-la e, por fim, é comentado sobre o software de elementos finitos utilizado para a obtenção dos resultados.

Já no capítulo 3 encontram-se as condições para a realização do estudo, contendo a modelagem da ferramenta e peça, as definições de malha, as condições de contorno, a teoria computacional utilizada e os procedimentos para medição da rugosidade.

O capítulo 4 apresenta os resultados e as discussões e por último, o capítulo 5, apresenta as conclusões gerais e sugestões para possíveis trabalhos futuros.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 ALUMÍNIO

O alumínio foi descoberto por Sir Humphrey Davy em 1809, tendo sido isolado pela primeira vez em 1825 por H. C. Hoersted. Apenas em 1886, porém, foi desenvolvido um processo industrial econômico de redução. Neste ano dois cientistas trabalhando independentemente, Charles Martin Hall, nos Estados Unidos, e Paul Louis Héroult, na França, inventaram o mesmo procedimento eletrolítico para reduzir a alumina do alumínio. O procedimento Hall-Héroult é o que se usa atualmente e consome cerca de 14,8 kWh_{cc} (média brasileira) para a produção de um quilo de alumínio primário. O elemento “alumínio” é abundante na crosta terrestre na forma de óxido de alumínio (Al_2O_3) e as reservas minerais são quase ilimitadas (ABAL, 2007).

Por ser um metal que pode ser facilmente transformado, através de todos os processos metalúrgicos convencionais, sendo assim viável à indústria manufatureira em qualquer forma que seja requerida, as atividades de pesquisas desenvolvidas pela própria indústria do alumínio, pelos laboratórios acadêmicos e pelos seus usuários tem levado a um maior conhecimento das características de engenharia deste metal. Além disso, técnicas de fabricação, de soldagem e de acabamento têm sido cada vez mais desenvolvidas, fazendo com que o alumínio seja considerado um material que não apresenta dificuldade nas suas aplicações.

2.1.1 Usinabilidade do alumínio

De maneira simplificada, pode-se entender usinabilidade como o grau de dificuldade de se usinar um determinado material. O alumínio, por sua vez, em geral pode ser facilmente usinado, já que a energia consumida por unidade de volume do metal é muito baixa e, com exceção nas ligas de alumínio-silício, o desgaste da ferramenta raramente é um problema. As temperaturas de corte são geralmente baixas e altas velocidade podem ser aplicadas. Entretanto, baseando-se na rugosidade da peça e na característica do cavaco, não se pode dizer que o alumínio tenha uma boa usinabilidade, pois em condições normais de usinagem, o cavaco formado é longo e o acabamento superficial obtido é insatisfatório. Em contrapartida, bons acabamentos superficiais podem ser obtidos se a velocidade de corte for suficientemente alta e a geometria da ferramenta for adequada (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

Para ligas com baixo teor de Silício, de 7-8%, a usinagem pode ser feita com classes de metal duro sem cobertura e com finos grãos. Além disso, como as forças de corte

são baixas, a potência necessária para usinagem também é baixa (SANDVIK, 2022). Segundo a Sandvik (2010b), para ligas de alumínio forjadas ou forjadas e trabalhadas a frio, não-envelhecidas, ou forjadas e envelhecidas a velocidade de corte recomendada varia geralmente de 250 a 2500 m/min, já o avanço pode variar de 0,05 a 0,8 mm/rot dependendo da resistência ao desgaste da liga.

2.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO E USINAGEM

O ato de construir uma peça com o formato e dimensões desejadas de projeto ou ainda transformar matérias primas em produtos acabados, por vários processos, seguindo planos bem organizados em todos os aspectos é denominado processo de fabricação. Comumente os processos de fabricação se dividem em: processo de fabricação por conformação mecânica, isto é, sem a separação de massa (sem a produção de cavaco) e processo de fabricação por usinagem (EEEP, 2021).

A usinagem, por sua vez, é um processo de fabricação no qual uma operação confere à peça forma, dimensões, acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzindo cavaco. Por cavaco entende-se: porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular (FERRARESI, 1977).

2.3 TORNEAMENTO

O torneamento é um processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com o auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes, sendo ferramentas monocortantes aquelas que possuem apenas um gume cortante e, nesse caso, devem apresentar dureza superior a do material a ser cortado. Nessa operação, para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo, tal trajetória pode ser retilínea ou curvilínea (FERRARESI, 1977).

O esquema apresentado na Figura 1, ilustra o processo de torneamento, no qual a ferramenta penetra na peça, cujo movimento rotativo uniforme ao redor do eixo "A" permite o corte contínuo e regular do material e a força necessária para retirada do cavaco é feita sobre a peça, enquanto a ferramenta, firmemente presa ao porta-ferramenta, contrabalança a reação desta força (SECCO; FILHO; OLIVEIRA, 1997).

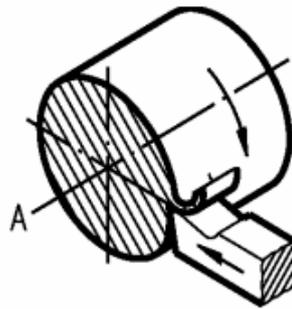


Figura 1 – Ilustração do processo de torneamento, onde a ferramenta penetra na peça que está girando em torno do eixo "A" (SECCO; FILHO; OLIVEIRA, 1997).

2.3.1 A máquina de torner

A máquina de torner, também chamada de torno, é uma máquina-ferramenta muito versátil pois além das operações de torneamento, ela pode executar operações normalmente feitas por outras máquinas como a furadeira, a fresadora e a retificadora, através de adaptações relativamente simples. Basicamente, todos os tornos, respeitando-se suas variações de dispositivos ou dimensões exigidas em cada caso, são compostos das seguintes partes:

1. **Corpo da máquina:** barramento, cabeçote fixo e móvel e caixas de mudança de velocidade.
2. **Sistema de transmissão de movimento do eixo:** motor, polia, engrenagens e redutores.
3. **Sistemas de deslocamento da ferramenta e de movimentação da peça em diferentes velocidades:** engrenagens, caixa de câmbio, inversores de marcha, fusos, vara etc.
4. **Sistemas de fixação da ferramenta:** torre, carro porta ferramenta, carro transversal, carro principal ou longitudinal e da peça: placas e cabeçote móvel.
5. **Comandos dos movimentos e das velocidades:** manivelas e alavancas.

Como as partes citadas acima são componentes comuns a todos os tornos, as diferenças entre essas máquinas residem na capacidade de produção, se é automático ou não e no tipo de comando: manual, hidráulico, eletrônico, por computador etc. A Figura 2 mostra uma representação desses elementos no torno.

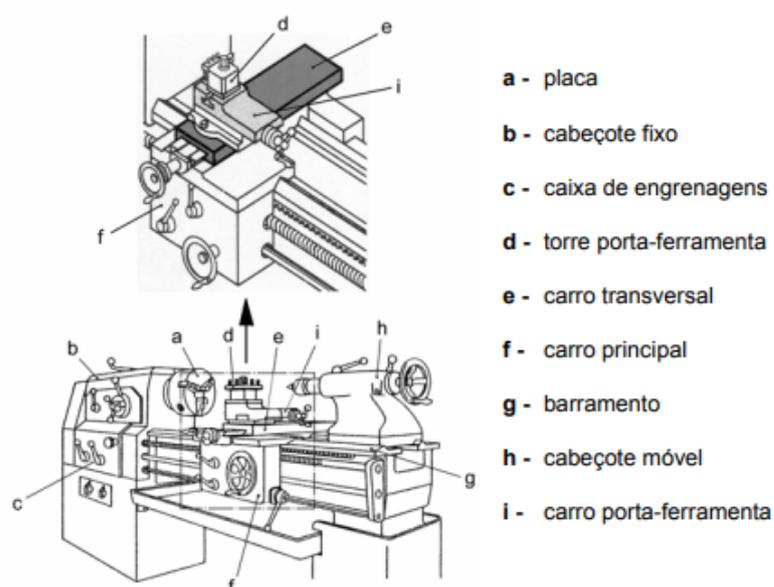


Figura 2 – Principais componentes de um torno (SECCO; FILHO; OLIVEIRA, 1997).

A Figura 3, por sua vez, ilustra as principais operações realizadas no torno. Nesses casos, a peça gira em torno de seu eixo enquanto a ferramenta de corte realiza os movimentos de avanço longitudinal e/ou transversal.

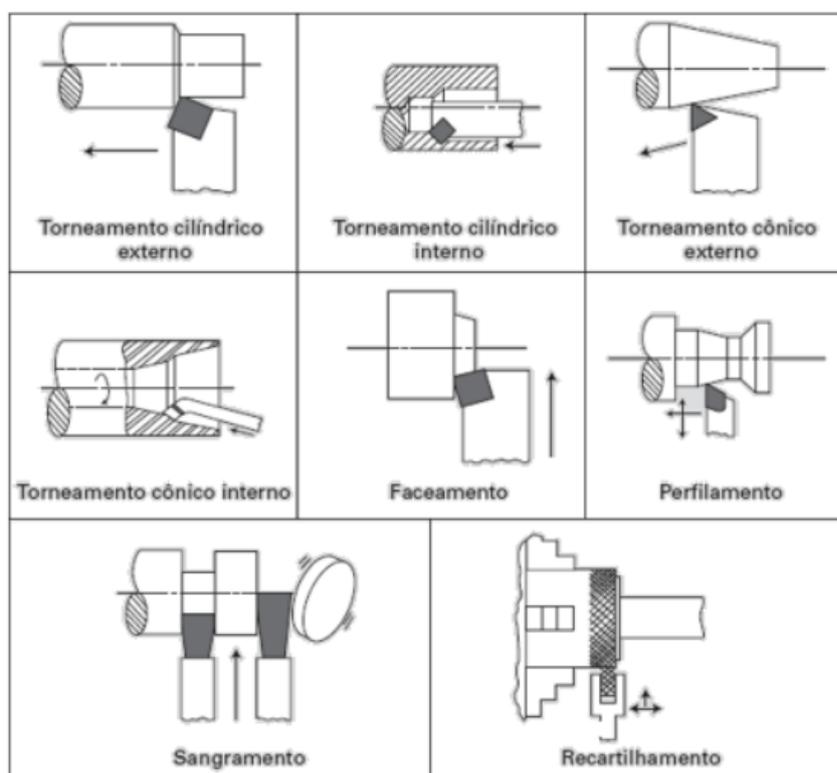


Figura 3 – Principais operações realizadas no torno (MACHADO; ABRÃO; COELHO, 2015).

2.4 GRANDEZAS FÍSICAS NO PROCESSO DE TORNEAMENTO

2.4.1 Movimentos entre a peça e a aresta cortante

Os movimentos, necessários para execução de procedimentos de usinagem, são aqueles relativos entre a peça e a aresta cortante e distinguem-se em movimentos que causam diretamente a saída de cavaco e aqueles que não tomam parte direta na formação de cavaco. Dessa forma, segundo Machado et al. (2009) os movimentos são:

1. **Movimento de corte:** movimento realizado entre a peça e a aresta de corte o qual sem o movimento de avanço, durante uma volta ou um curso, origina somente uma remoção de cavaco.
2. **Movimento de Avanço:** movimento realizado entre a peça e a aresta de corte que, juntamente ao movimento de corte, provoca a retirada contínua de cavaco.
3. **Movimento efetivo de corte:** movimento resultante dos movimentos de corte e avanço operando simultaneamente.
4. **Movimento de aproximação:** movimento entre a peça e a ferramenta, com o qual a ferramenta, antes da usinagem, é aproximada à peça.
5. **Movimento de ajuste:** movimento entre a peça e a ferramenta que determina a espessura da camada de material a ser retirada.
6. **Movimento de correção:** movimento de correção entre a peça e a ferramenta, no qual o desgaste da ferramenta deve ser compensado.

Cabe ressaltar, portanto, que os movimentos de aproximação, ajuste e correção não causam diretamente a formação de cavaco.

2.4.2 Direção dos movimentos

De acordo com Machado et al. (2009) devem-se distinguir as direções dos movimentos que causam diretamente a retirada de cavaco, da seguinte forma:

1. **Direção de corte:** instantânea do movimento de corte.
2. **Direção de avanço:** instantânea do movimento de avanço.
3. **Direção efetiva:** instantânea do movimento efetivo de corte.

2.4.3 Velocidades e Profundidade de corte

O torneamento requer três parâmetros de ajustes para realização desse procedimento no torno: velocidade de corte (v_c), velocidade de avanço (v_a) e profundidade de corte (a_p). Tais parâmetros podem ser definidos da seguinte forma:

1. **Velocidade de corte (v_c):** velocidade de rotação da peça ou a taxa na qual a superfície não cortada da peça passa pela aresta de corte da ferramenta, expressa em (m/min) conforme a Equação 2.1.

$$v_c = \frac{\pi * d * n}{1000} \quad (2.1)$$

Onde:

d = Diâmetro de corte (m).

n = Rotação (RPM).

2. **Velocidade de Avanço (v_f):** velocidade de deslocamento de uma ferramenta em cada volta de 360° de uma peça (avanço em mm/rotação), ou por unidade de tempo (avanço em mm/minuto), conforme a Equação 2.2.

$$v_f = f * n \quad (2.2)$$

Onde:

f = Avanço (mm/rot).

n = Rotação (RPM).

3. **Profundidade de corte (a_p):** profundidade de penetração da ferramenta, medida perpendicular ao plano de trabalho, definida pelas direções de avanço e velocidade da ferramenta.

Cabe ainda citar a velocidade efetiva de corte (v_e), sendo ela a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido efetivo do corte. A mesma é calculada vetorialmente de acordo com a Equação 2.3:

$$v_e = v_c + v_f \quad (2.3)$$

A seleção das velocidades de corte, de avanço e, conseqüentemente, da velocidade efetiva ideais depende da operação de usinagem e dos materiais da ferramenta e da peça. Além destas, têm-se também as velocidades de aproximação, de ajuste, de correção e de recuo que, embora não atuem diretamente na formação de cavaco, são importantes especialmente em máquinas comandadas numericamente, visto que valores elevados para tais

velocidades contribuem para a redução do tempo total de fabricação da peça (MACHADO et al., 2009).

A Figura 4 apresenta em esquema o torneamento externo de uma peça, onde é possível identificar os movimentos e as direções do corte.

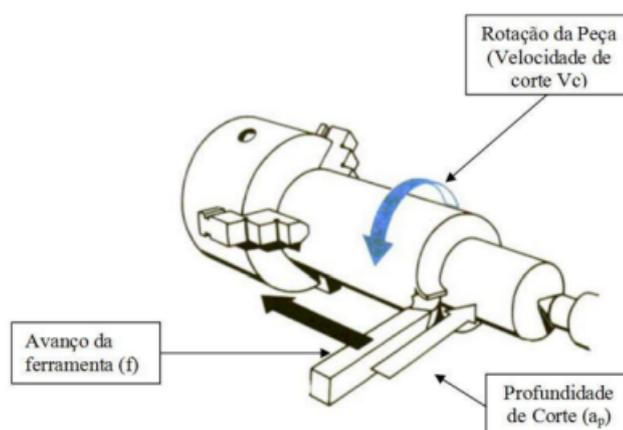


Figura 4 – Representação dos movimentos no processo de torneamento (SOUZA, 2017).

2.5 FERRAMENTA DE CORTE

2.5.1 Geometria

A geometria do corte é uma série de propriedades geométricas das ferramentas de corte capaz de influenciar a vida útil da ferramenta, a formação e a evacuação de cavacos, a estabilidade e a segurança. Resumidamente, a boa geometria do corte é um ajuste em que a formação de cavacos ocorre de maneira correta sem muito esforço. Sendo assim, as seguintes definições são essenciais para determinação da ferramenta.

1. **Cunha de Corte:** é a cunha formada pelas superfícies de saída e de folga da ferramenta. Através do movimento relativo entre a peça e a ferramenta, formam-se os cavacos sobre a cunha de corte.
2. **Superfície de Saída $A\gamma$:** superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco se desliza.
3. **Arestas de Corte:** são as arestas da cunha de corte formada pelas superfícies de saída e de folga. Deve-se distinguir a aresta principal de corte "S" e a aresta secundária de corte "S'":
 - **Aresta Principal de Corte S:** é a aresta de corte cuja cunha de corte, observada no plano de trabalho, e para um ângulo da direção de avanço $\phi = 90^\circ$, indica a direção de avanço.

- **Aresta Secundária de Corte S'**: é a aresta de corte cuja cunha de corte, observada no plano de trabalho, e para o ângulo da direção de avanço $\phi = 90^\circ$, indica a direção contrária à direção de avanço.
4. **Ponta de Corte**: parte da cunha de corte onde se encontram as arestas principal e secundária de corte.
 5. **Ponto de Corte Escolhido**: ponto destinado à determinação das superfícies e ângulos da cunha de corte, ou seja as definições se referem a um ponto da ferramenta, dito ponto de corte escolhido ou “Ponto de Referência”.

As Figuras 5 e 6 demonstram esses elementos na ferramenta.

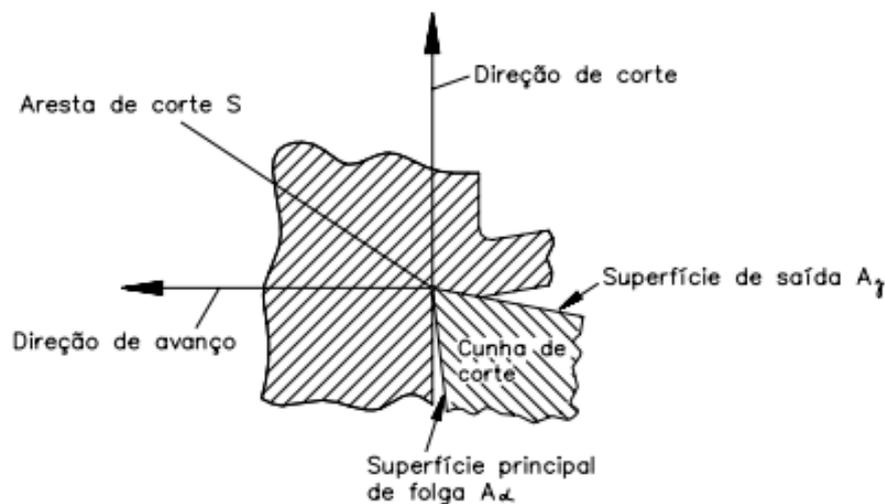


Figura 5 – Cunha de Corte da Ferramenta (FERRARESI, 1970).

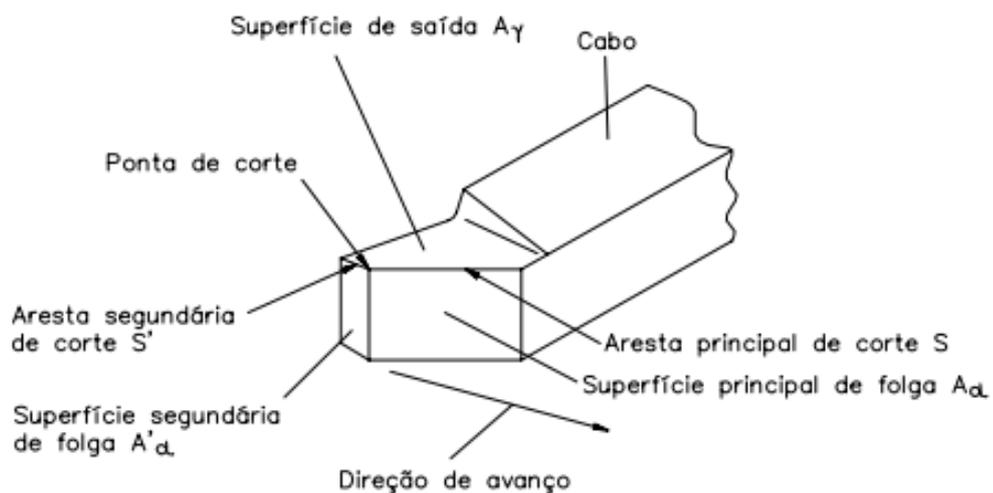


Figura 6 – Arestas de corte e superfícies da cunha de corte de uma ferramenta de torno (MACHADO; ABRÃO; COELHO, 2015).

Além das definições acima, os ângulos atrelados as ferramentas de corte também são de suma importância, pois influenciam na vida útil da ferramenta, no acabamento da superfície da peça/trabalho usinada e na quantidade de força necessária para cisalhar o cavaco da peça de trabalho. Os principais ângulos fornecidos nas ferramentas são mostrados na Figura 7.

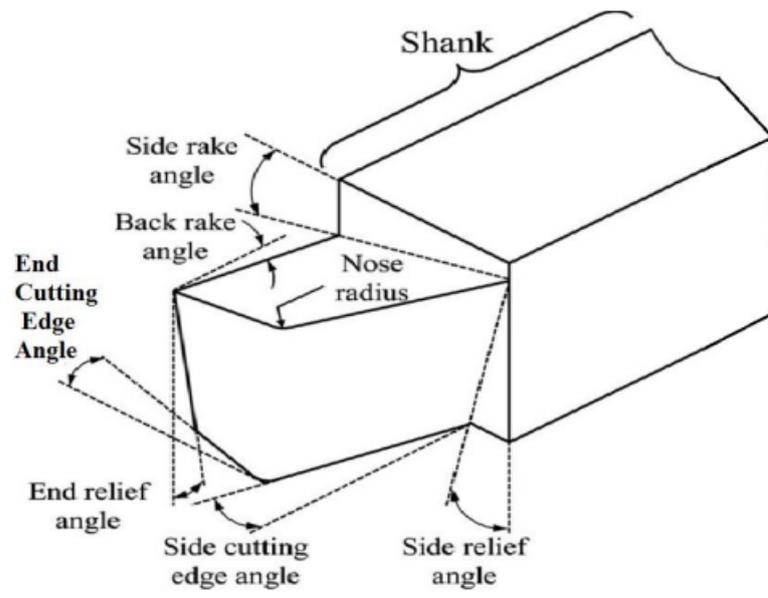


Figura 7 – Principais ângulos das ferramentas de corte (ELMELIGY, 2016).

Segundo Ferraresi (1970), os ângulos mostrados na Figura 7 podem ser definidos da seguinte forma:

1. **Side cutting edge angle (SCEA):** é o ângulo entre a aresta principal de corte e a lateral da haste da ferramenta. Este ângulo evita interferências quando a ferramenta entra no material de trabalho e também afeta a vida útil da ferramenta, bem como o acabamento superficial. O maior valor deste ângulo tenderá a separar a ferramenta e a peça de trabalho, resultando em trepidação.
2. **End cutting edge angle:** ângulo entre a aresta lateral de corte e a linha normal à superfície lateral da haste da ferramenta. Este ângulo fornece uma folga para a extremidade traseira da aresta de corte para evitar atrito entre a superfície mecânica e a parte traseira (não cortante) da aresta de corte.
3. **Back rake angle (BR):** a face superior da ferramenta sobre a qual o cavaco flui é conhecida como face de saída ou simplesmente face. O ângulo entre esta face e a normal à superfície usinada é conhecido como ângulo de saída. O ângulo de inclinação traseiro controla a direção do fluxo dos cavacos e a nitidez da aresta de corte. Facilita a remoção e descarte de cavacos e, assim, reduz a pressão de corte.

4. **Side Rake Angle (SR):** é o ângulo entre a face superior retificada da ferramenta e o plano superior da ferramenta; medido no ângulo reto com o eixo longitudinal da ferramenta. Ele controla a direção e a quantidade de envio dos cavacos. A quantidade de envio aumenta com o aumento do ângulo de inclinação lateral.
5. **End clearance angle and side clearance angle:** Estes ângulos são fornecidos para proteger o atrito entre o flanco da ferramenta e a superfície da peça de trabalho. Ferramentas com valores aumentados de ângulos de folga, penetram no material da peça de trabalho com mais eficiência e isso reduz as forças de corte. Ângulos de folga muito grandes enfraquecem a aresta de corte e a dissipação de calor da aresta de corte será diminuída.

2.5.2 Materiais

O material é uma questão essencial para a seleção da ferramenta de corte, ele varia de acordo com as necessidades específicas de cada processo, mas no geral devem apresentar algumas propriedades fundamentais, tais como: boa dureza, boa tenacidade, resistência ao desgaste, resistência ao choque térmico, resistência à deformação plástica, resistência à compressão e cisalhamento, boas propriedades mecânicas e térmicas a altas temperaturas e inércia química (FERRARESI, 1970).

Como dureza e tenacidade são duas propriedades distintas (normalmente alta dureza se associa a baixa tenacidade e vice-versa), o balanço dessas propriedades se tornou um desafio para os fabricantes. A conciliação dessas propriedades foi conseguida com a produção de ferramentas com diferentes composições químicas, refinamento de grãos, controle dos processos de fabricação e do tratamento térmico, o que lhes confere graus compatíveis de pureza e qualidade. Os principais grupos de materiais de ferramentas são apresentados na Figura 8 a seguir, listados em uma ordem cronológica aproximada de surgimento e também seguindo uma ordem de aumento de resistência ao desgaste (ou dureza), o que significa uma ordem inversa de aumento de tenacidade (MACHADO; ABRÃO; COELHO, 2015).

1. Aço-carbono	
<ul style="list-style-type: none"> • Comum • Com elementos de liga (V, Cr) 	
2. Aço semirrápido (baixo W)	
3. Aço rápido (pode ser fundido ou fabricado pela metalurgia do pó)	
<ul style="list-style-type: none"> • Sem revestimento • Com revestimento 	
4. Aço super-rápido (elevado teor de V)	
5. Ligas fundidas	
6. Metal duro (pode ser com ou sem revestimento)	
Classes: <ul style="list-style-type: none"> • P • M • K • N • S • H 	
7. Cermets (podem ser com ou sem revestimento)	
8. Cerâmicas	
<ul style="list-style-type: none"> • Com e sem revestimento • À base de Si_3N_4 { SIALON • À base de Al_2O_3 { • Pura <ul style="list-style-type: none"> • Com adições • ZrO_2 (branca) • TiC (preta ou mista) • SiC (<i>whiskers</i>) 	
9. Ultraduros	
<ul style="list-style-type: none"> • CBN – PCBN • PCD 	
10. Diamante natural	

Figura 8 – Principais grupos de materiais de ferramentas listados em ordem cronológica aproximada de surgimento (MACHADO; ABRÃO; COELHO, 2015).

O aço rápido e o metal duro são dois dos materiais mais importantes e mais utilizados na indústria. O aço rápido (ou HSS, do inglês *High Speed Steel*) revolucionou a prática de usinagem na época de seu desenvolvimento no século XIX, resultando em um grande aumento da produtividade, já que as velocidades de corte puderam ser aumentadas em cerca de 10 vezes, passando de 3 a 5 m/min com as ferramentas de aço-carbono, para 30 a 35 m/min com as de aço rápido. O segundo grande impulso na área dos materiais para ferramentas de corte se deu através do metal duro, pois com este, novamente, as velocidades de corte puderam ser aumentadas em praticamente dez vezes (de 35 m/min para 250 m/min a 300 m/min) (MACHADO; ABRÃO; COELHO, 2015).

2.5.3 Escolha de ferramentas de Metal Duro

Para esse tipo de ferramenta utiliza-se uma pastilha e um porta-ferramenta, sendo que a pastilha deve ser selecionada de acordo com o material da peça e a operação a ser realizada e o porta-ferramenta, por sua vez, deve ser compatível com o formato de pastilha.

A Figura 9 apresenta as relações entre o código da ferramenta e do porta-ferramenta, na qual cada quadrículo indica uma propriedade geométrica conforme exposto no Anexo A.

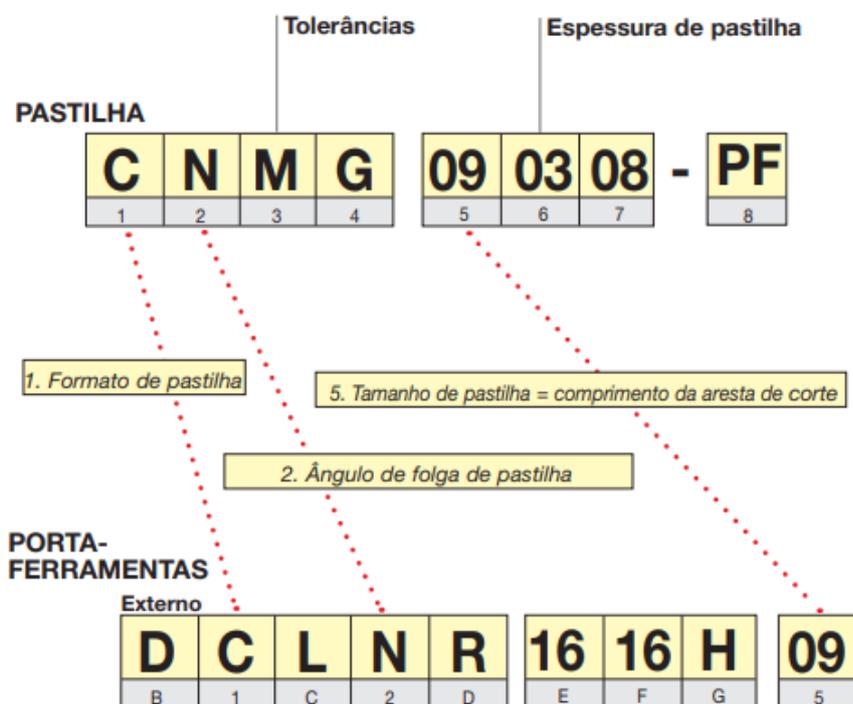


Figura 9 – Relações entre os códigos para pastilhas e suportes (SANDVIK, 2010a).

2.6 FORMAÇÃO DE CAVACO

Como citado anteriormente, o cavaco é um dos parâmetros que define a ocorrência da operação de usinagem, além disso, o mesmo influencia no desgaste da ferramenta, no acabamento superficial da peça, na força de usinagem, no esforço de corte e na segurança do processo. Em geral, nas condições normais de usinagem com ferramentas de metal duro e aço rápido, a formação de cavaco ocorre da seguinte forma:

1. **Recalque inicial:** à medida que a cunha de corte penetra no material da peça de trabalho, uma pequena porção dela, ainda presa à peça de trabalho, é pressionada, ou seja, recalçada contra a superfície de saída da ferramenta.
2. **Deformação e ruptura:** o material que está sendo prensado sofre primeiro uma deformação elástica, depois uma deformação plástica, que aumenta gradativamente até que o estado de tensão cause a ruptura. Na maior parte dos casos, essa fratura ocorre por cisalhamento, embora haja um estado de tensão que combina tensões de compressão/tração e cisalhamento e faz com que o material se rompa de acordo com alguns critérios de sua fragilidade ou ductilidade. Após a ruptura, forma-se uma trinca, que também se propaga seguindo os critérios de propagação de trinca

específicos de cada material. Como a formação de cavacos ocorre dinamicamente, existem planos transitórios de fratura e propagação de trincas que definem uma região entre a peça e o cavaco, chamada de “zona de cisalhamento primário”.

3. **Deslizamento de lamelas:** à medida que a ferramenta continua a penetrar na peça, ocorre fratura parcial ou completa da região cisalhada, dependendo da extensão da propagação da trinca. As propriedades do material e as condições de avanço e velocidade de corte determinarão quantos segmentos de material quebrado irão aderir ao cavaco recém formado, resultando em um cavaco contínuo ou descontínuo, dependendo da extensão e força da ligação entre as lamelas de material rompido.
4. **Saída do cavaco:** a porção de material rompida escorrega sobre a superfície de saída da ferramenta.

Do exposto conclui-se que o fenômeno de formação de cavaco nas condições normais de trabalho com ferramentas de metal duro e aço rápido é um fenômeno periódico, inclusive a formação do cavaco contínuo. Tem-se alternadamente uma fase de recalque e uma fase de escorregamento para cada pequena porção de material removido (FERRRESI, 1977).

Na fabricação de peças por usinagem, as principais preocupações estão voltadas para a qualidade das peças produzidas, isto é, acabamento superficial e tolerâncias obtidas, e na produtividade com baixo custo. Sendo assim, no corte contínuo, principalmente no torneamento de materiais dúcteis a altas velocidades, o controle do cavaco pode se tornar imperativo e o fator mais importante numa linha de produção. Para Machado e Silva (2004) a produção de cavacos longos, por sua vez, pode causar os seguintes problemas:

- Problemas econômicos no manuseio e no processo de descarte, ou reaproveitamento devido as baixas densidades efetivas.
- Enrolar em torno da peça, da ferramenta ou de componentes da máquina, os quais a temperaturas elevadas e com arestas laterais afiadas, representam um verdadeiro risco à integridade física do operador.
- Quando enrolados na peça, apesar de afetar pouco o acabamento superficial, produzem uma superfície não atrativa, e podem causar danos à ferramenta.
- Afetar forças de usinagem, temperatura de corte e vida das ferramentas.
- Impedir o acesso regular do fluido de corte (efeito guarda-chuva).

2.7 FLUIDO DE CORTE

A grande perda de calor gerada pelo atrito entre a peça e a ferramenta é uma das causas para resultados insatisfatórios e aumento de gastos na operação de usinagem. Afim de diminuir ou dissipar parte desse calor produzido, utiliza-se fluidos de corte. Consequentemente, os resultados podem melhorar tanto na peça usinada quanto no desgaste pré-maturo da ferramenta (KIKUKAWA et al., 2019).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (1999) os fluidos de corte podem realizar uma ou mais funções, entre as seguintes: refrigerar a ferramenta, o cavaco produzido e a peça usinada; lubrificar o local de contato peça-ferramenta, diminuindo a fricção, reduzindo a erosão e a deterioração da ferramenta, aumentando-se a sua vida útil e colaborando para uma minimização de calor produzido na área usinada, monitorando ainda o surgimento da aresta postiça, no caso de ferramentas de geometria definida; lavagem, afastando os cavacos da área usinada; fornecer uma proteção anticorrosiva. A influência relativa de cada uma das aplicações dependerá ainda do material usinado, do perfil de ferramenta utilizada, das possibilidades de usinagem, do acabamento superficial e do controle dimensional exigido.

2.8 RUGOSIDADE

A importância do estudo do acabamento superficial aumenta à medida que cresce a precisão de ajuste entre peças a serem acopladas, onde somente a precisão dimensional, de forma e de posição não são suficientes para garantir a funcionalidade do par acoplado. Desse modo, torna-se fundamental a especificação do acabamento das superfícies através da rugosidade superficial. A rugosidade superficial é usualmente definida como a medida do perfil real da superfície, quando relacionada com seu desvio nominal, sendo função do tipo de acabamento ou da máquina-ferramenta. Na análise entre os desvios da superfície real da superfície geométrica, distinguem-se: a) desvios macrogeométricos ou desvios de forma, que podem ser medidos com instrumentos de medição convencionais; b) desvios microgeométricos ou rugosidade, que só podem ser medidos através de aparelhos especiais tais como: rugosímetros, perfilógrafos, perfiloscópios etc (AGOSTINHO, 2018).

Simplificadamente portanto, rugosidade é o conjunto de irregularidades das superfícies. Isto é, são as pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície, visto que, por mais perfeitas que pareçam, as superfícies dos componentes mecânicos são resultados do processo de fabricação, sendo assim, apresentam irregularidades, com espaçamento regular ou irregular, que tendem a formar um padrão ou textura característicos em sua formação. A norma ISO 4287:1997 trata das definições e parâmetros para a determinação do estado da superfície (rugosidade, ondulação e perfil primário). Conforme a Figura 10, o perfil de rugosidade é derivado do perfil primário, através da aplicação dos

filtros λ_s e λ_c , sendo que este último define a separação entre as componentes de rugosidade e ondulação. O filtro λ_s define a separação entre os componentes de rugosidade e os componentes de onda mais curtos presentes na superfície.

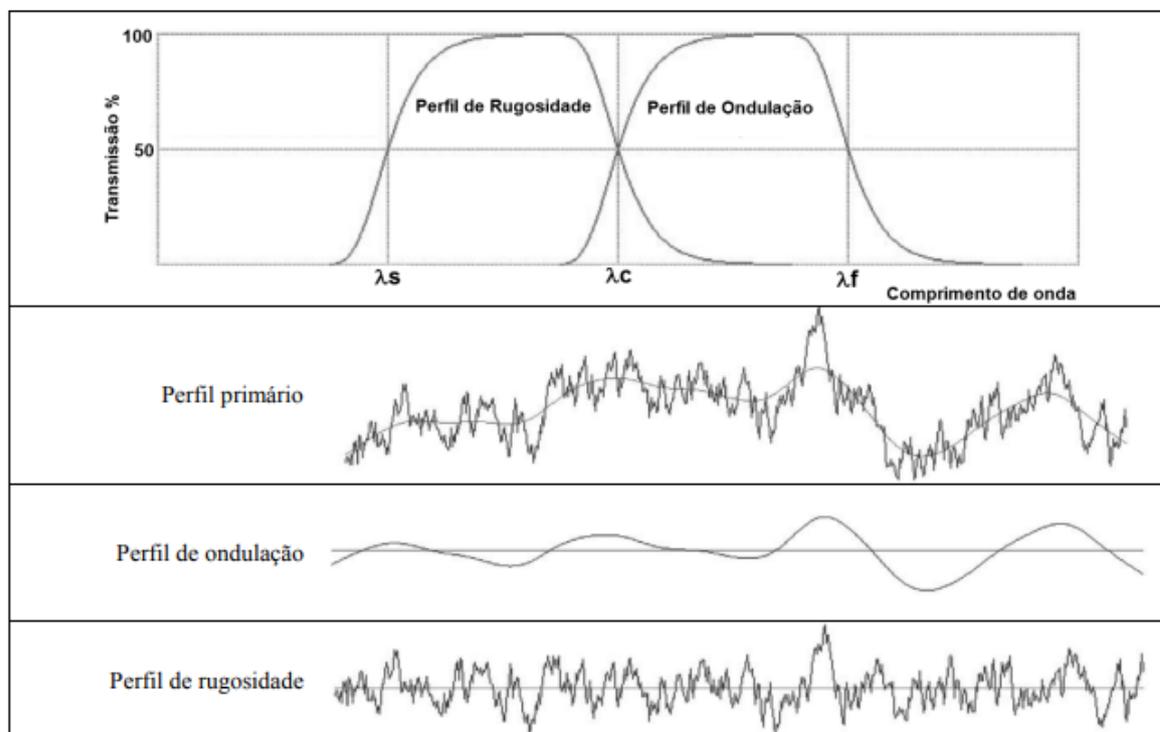


Figura 10 – Características de transmissão e representação dos perfis de rugosidade e de ondulação (BECKER et al., 2012).

Os parâmetros calculados a partir do perfil de rugosidade recebem o prefixo "R", sendo estimados em um comprimento de avaliação (l_n). Este comprimento pode conter um ou mais comprimentos de amostragem (l_r), como apresentado na Figura 11. O comprimento de amostragem é numericamente igual ao comprimento de onda do filtro de perfil λ_c . A linha média utilizada como referência para a obtenção dos parâmetros de rugosidade corresponde à componente do perfil de onda longa suprimida pelo filtro de perfil λ_c (BECKER et al., 2012).

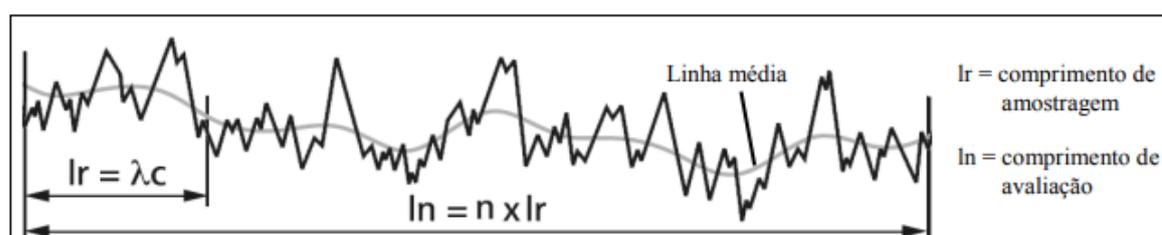


Figura 11 – Comprimento de amostragem e comprimento de avaliação (BECKER et al., 2012).

Normalmente é recomendado um comprimento de avaliação equivalente a cinco vezes o comprimento de amostragem, de forma a obter uma maior confiabilidade dos dados. A Tabela 1 apresenta esses valores de acordo com a Norma ISO 4288 (1996):

Tabela 1 – Valores recomendados para comprimentos de amostragem e de avaliação.

Faixa de R_a (μm)	Comprimento de amostragem l_r (mm)	Comprimento de avaliação l_n (mm)
Até 0,02	0,08	0,4
De 0,02 a 0,1	0,25	1,25
De 0,1 a 2	0,8	4
De 2 a 10	2,5	12,5
De 10 a 80	8	40

Fonte: VALIM (2018).

O rugosímetro, aparelho eletrônico amplamente empregado na indústria para medir rugosidade assegura um alto padrão de qualidade nas medições. Os sistemas de medida mais utilizados são: desvio médio aritmético – R_a (CLA – *Center Line Average*), desvio médio quadrático – R_q (RMS – *Root Mean Square Average*) e altura máxima das irregularidades – R_{max} . Em relação ao parâmetro R_a , este tem a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas $Z(x)$ calculada no comprimento de amostragem (l_r), conforme representado na Figura 12 e na Equação 2.4.

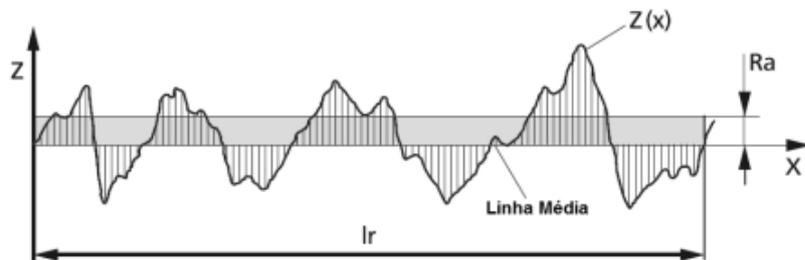


Figura 12 – Parâmetro de amplitude R_a (BECKER et al., 2012).

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (2.4)$$

2.8.1 Vantagens e Desvantagens do parâmetro R_a

A rugosidade por desvio médio aritmético, ou R_a , é amplamente utilizada quando deseja-se realizar um controle contínuo de produção em processos de fabricação com sulcos bem orientados, como no torneamento, fresamento etc ou ainda em superfícies de pouca responsabilidade, como no caso de acabamentos com fins apenas estéticos (RODRIGUES; JASINEVICIUS, 2018).

De acordo com [Secco, Filho e Oliveira \(1997\)](#), as vantagens do parâmetro R_a consistem no fato do mesmo ser o parâmetro de medição mais utilizado em todo o mundo, aplicável à maioria dos processos de fabricação e por isso quase todos os equipamentos apresentam esse parâmetro (de forma analógica ou digital eletrônica). Além disso os riscos superficiais inerentes ao processo não alteram muito seu valor. Para a maioria das superfícies, o valor da rugosidade nesse parâmetro está de acordo com a curva de Gauss, que caracteriza a distribuição de amplitude.

Como desvantagens têm-se que por o valor de R_a em um comprimento de amostragem indicar a média da rugosidade, se um pico ou vale não típico aparecer na superfície, o valor dessa média não sofrerá grande alteração, ocultando o defeito. O valor de R_a também não define a forma das irregularidades do perfil, dessa forma, pode-se obter um valor de R_a para superfícies originadas de processos diferentes de usinagem como ilustrado na [Figura 13](#). Nenhuma distinção é feita entre picos e vales, portanto, para alguns processos de fabricação com frequência muito alta de vales ou picos, como é o caso dos sinterizados, o parâmetro não é adequado, já que a distorção provocada pelo filtro eleva o erro a altos níveis ([SECCO; FILHO; OLIVEIRA, 1997](#)).

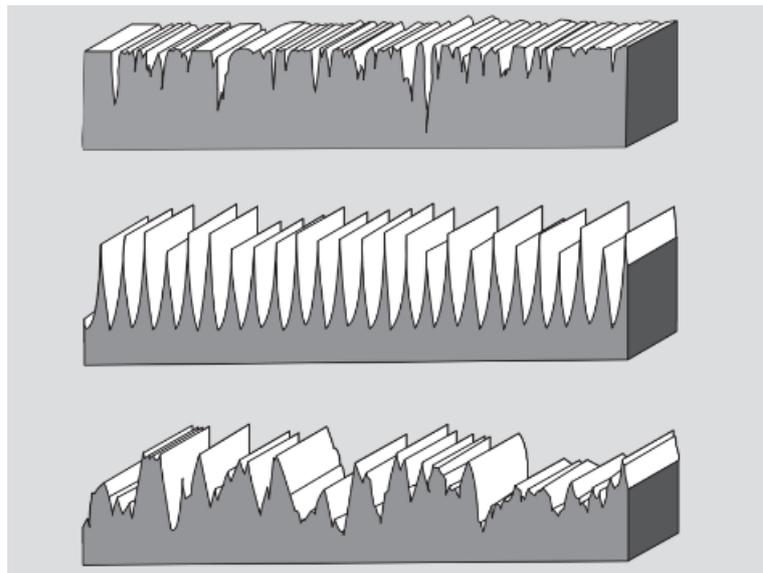


Figura 13 – Representação de diferentes superfícies com o mesmo valor de R_a ([VALIM, 2018](#)).

2.8.2 Simbologia, equivalência e processos de usinagem

A [Figura 14](#) que se segue classifica os acabamentos superficiais, geralmente encontrados na indústria mecânica, em 12 grupos e os organiza de acordo com o grau de rugosidade e o processo de usinagem que pode ser usado em sua obtenção. Permite, ainda, visualizar uma relação aproximada entre a simbologia de triângulos, as classes e os valores de R_a em μm . Dessa forma, no processo de torneamento é possível obter rugosidades bem

altas para o caso de desbastes até rugosidades de $0,2\mu\text{m}$ para operações com cuidados e métodos especiais.

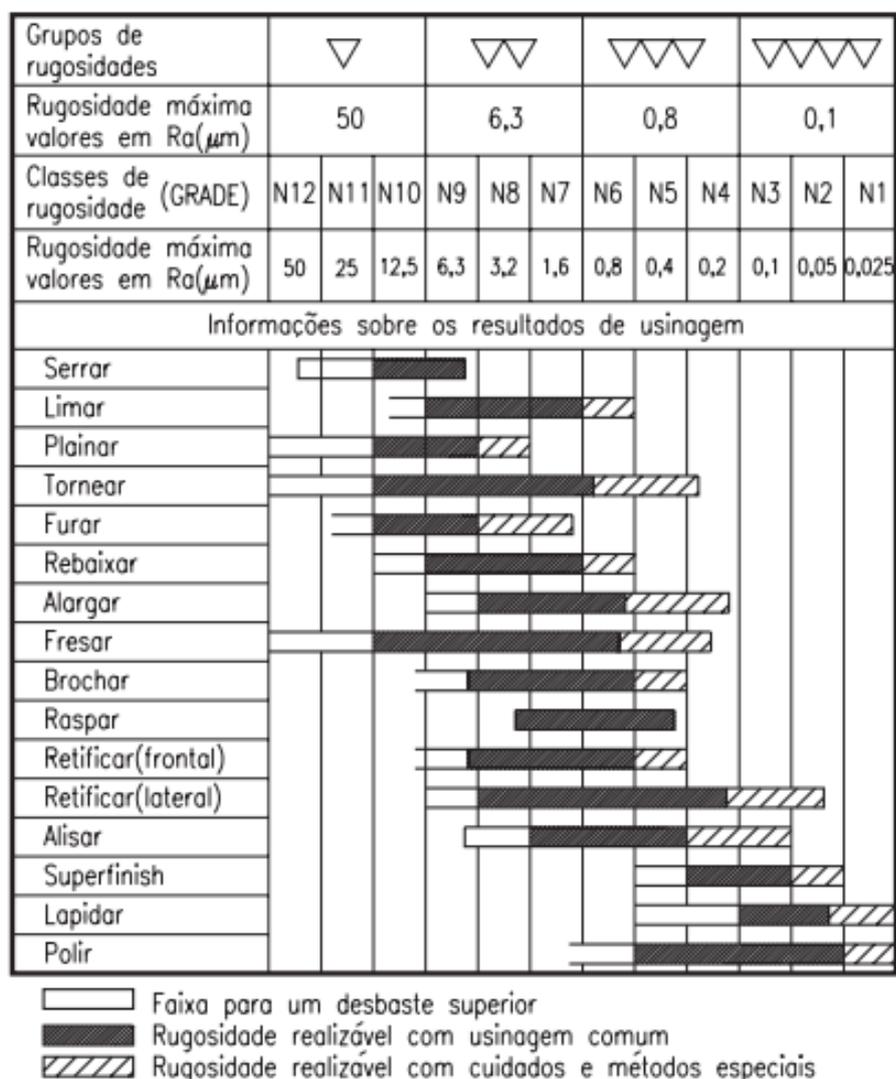


Figura 14 – Classificação dos acabamentos superficiais de acordo com o grau de rugosidade e o processo de usinagem (SECCO; FILHO; OLIVEIRA, 1997).

2.8.3 Influência dos parâmetros de corte no valor da rugosidade

Após a definição da peça a ser usinada e da ferramenta, os três parâmetros que mais afetam a rugosidade e que serão estudados no presente trabalho são: velocidade de avanço, velocidade de corte e profundidade de corte.

Machado, Abrão e Coelho (2015) afirma que a rugosidade superficial sofre influência de vários parâmetros de usinagem, incluindo a geometria da ferramenta de corte, a geometria da peça, a rigidez da máquina – ferramenta, o material da peça, as condições de corte e o material da ferramenta. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (1999), todavia, o acabamento de peças torneadas depende muito da relação entre o avanço (f) e o raio

de ponta (r_ϵ), onde o par $f - r_\epsilon$ têm uma contribuição geométrica à rugosidade superficial dada pela Equação 2.5, na qual quanto maior o raio de ponta da ferramenta, menor a rugosidade e melhor o acabamento superficial, no entanto, maior será a vibração por causa do contato com a peça. Tal equação é considerada teórica justamente por considerar apenas esses dois parâmetros e é utilizada somente com o intuito de expressar uma noção sobre a rugosidade, já que a rugosidade real obtida após uma operação de corte será bem maior por ser afetada por diversas outras condições como citado anteriormente.

$$R_{max} = \frac{f^2}{8r_\epsilon} * 1000 [\mu m] \quad (2.5)$$

Em relação a velocidade de corte, [Cunha e Ribeiro \(2003\)](#) comprova experimentalmente que com o aumento da velocidade de corte verifica-se uma queda significativa da rugosidade, visto que o aparecimento da aresta postiza de corte (APC) é muito mais frequente quando se trabalha em baixas velocidades de corte e sua presença dificulta a obtenção de superfícies bem acabadas e dimensionalmente precisas.

A profundidade de corte, por fim, é a condição de corte que influencia em menor grau o acabamento superficial obtido. [Bonifacio \(1983\)](#) afirma que não existe uma influência marcante da profundidade de corte na rugosidade, pelo menos para valores menores que 1 mm.

2.9 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Os métodos analíticos clássicos permitem o cálculo da resposta exata dos deslocamentos, deformações e tensões na estrutura em todos os seus pontos, isto é, nos seus infinitos pontos, porém essas soluções são somente conhecidas para alguns casos, que fogem da maioria das aplicações práticas encontradas no dia a dia. Tornou-se interessante então desenvolver procedimentos aproximados, que pudessem ser aplicados em caráter geral, independente da forma da estrutura e da condição de carregamento, dentro da precisão aceitável do problema de engenharia, dando origem ao Método dos Elementos Finitos ([FILHO, 2009](#)).

Por intermédio de técnicas numéricas, no caso o Método dos Elementos Finitos, pode-se determinar o comportamento estrutural de componentes com formas complexas, utilizando os "softwares" de análise disponíveis. Os programas de computador requerem o conhecimento das propriedades dos componentes, tais como espessuras, módulos de elasticidade, coeficientes de Poisson, densidades de massa etc. Conhecendo o carregamento atuante na forma de forças, pressões, cargas gravitacionais e condições de fixação da estrutura, pode-se determinar as regiões mais solicitadas do componente, estabelecendo-se previsões a respeito do seu comportamento. Dessa forma, as devidas correções serão

efetuadas já no âmbito do desenvolvimento do projeto, evitando gastos excessivos inerentes à execução de projetos desenvolvidos pelo processo de Tentativa e Erros.

Segundo [Filho \(2009\)](#), o Método dos Elementos Finitos é, portanto, um método aproximado de cálculo de sistemas contínuos, de modo que a estrutura, o componente mecânico ou, de forma geral, o corpo contínuo é subdividido em um número finito de partes (ou elementos), que constituem o modelo matemático e tem o seu comportamento especificado por um número finito de parâmetros. A estratégia de solução do sistema, ou seja, da montagem dos elementos, é a mesma estratégia do método geral para análises de sistemas discretos. Sendo assim, a precisão desse método depende da quantidade de nós, dos elementos e do tamanho e tipo desses elementos de malha, em outras palavras, quanto menor o tamanho e maior for o número de elementos e nós em uma determinada malha, maior será a precisão nos resultados de análise. O uso de Método dos Elementos Finitos revela-se então como um grande diferencial, reduzindo os prazos e enxugando os custos, desenvolvendo assim o poder competitivo das empresas.

2.10 O SOFTWARE DEFORM

DEFORM é um sistema de simulação de processos baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) projetado para analisar vários processos de conformação e tratamento térmico usados na indústria. Ao simular processos de fabricação em um computador, essa ferramenta avançada permite que projetistas e engenheiros reduzam a necessidade de testes caros e redesenho de ferramentas e processos, melhorem o projeto de ferramentas e matrizes para reduzir os custos de produção e material e encurtem o tempo de espera para trazer um novo produto ao mercado ([FLUHRER, 2010](#)).

O DEFORM é adaptado para modelagem de deformação, no qual uma interface gráfica de usuário relativamente amigável fornece a preparação de dados. O sistema de malha é automático e otimizado, adaptado para grandes problemas de deformação. O DEFORM-HT adiciona a capacidade de modelagem de processos de tratamento térmico, incluindo normalização, recozimento, têmpera, têmpera, envelhecimento e cementação. Além disso, o DEFORM-HT também pode prever dureza, tensões residuais, deformação de têmpera e outras características mecânicas e materiais importantes para aqueles que tratam termicamente.

A abordagem geral para realizar qualquer simulação no DEFORM é definir a geometria e o material da peça inicial e, em seguida, simular sequencialmente cada processo que deve ser aplicado à peça. De acordo com [Fluhrer \(2010\)](#), a sequência recomendada para projetar um processo de fabricação usando DEFORM está descrita abaixo.

1. Defina seu processo proposto

- Geometria final da peça forjada
 - Material
 - Progressões de ferramentas
 - Geometria inicial da peça/tarugo
 - Temperaturas de processamento, reaquecimentos, etc.
2. Reúna os dados necessários
 - Dados do material
 - Dados da condição do processo
 3. Usando o pré-processador DEFORM, insira a definição do problema para a primeira operação
 4. Envie os dados para simulação
 5. Usando o pós-processador DEFORM, reveja o resultados
 6. Repita a sequência de pré-processamento-simulação-revisão para cada operação no processo
 7. Se os resultados forem inaceitáveis, use sua experiência em engenharia e julgamento para modificar o processo e repetir a sequência de simulação.

2.10.1 Pré-processador

O pré-processador DEFORM usa uma interface gráfica de usuário para montar os dados necessários para executar a simulação. Os dados de entrada incluem: Descrição do objeto, englobando todos os aspectos associados a um objeto, incluindo geometria, malha, temperatura, material, etc; Características dos materiais, abrangendo dados que descrevem o comportamento do material sob as condições que ele razoavelmente experimentará durante a deformação; Condições entre objetos, descreve como os objetos interagem uns com os outros, incluindo contato, atrito e transferência de calor; Controles de simulação, contém instruções sobre os métodos que o DEFORM deve usar para resolver o problema, incluindo as condições do ambiente de processamento, quais processos físicos devem ser modelados, quantos passos de tempo discretos devem ser usados para modelar o processo, etc; Dados entre materiais, descreve o processo físico de uma fase de um material se transformando em outras fases do mesmo material em um processo de tratamento térmico. Por exemplo, a transformação da austenita em perlita, bainita e martensita.

2.10.2 Pós-processador

O pós-processador é usado para visualizar os dados da simulação após a simulação ter sido executada. O pós-processador apresenta uma interface gráfica do usuário para visualizar a geometria, dados de campo, como deformação, temperatura e tensão, e outros dados de simulação, como cargas de matriz. O pós-processador também pode ser usado para extrair dados gráficos ou numéricos para uso em outras aplicações.

2.10.3 DEFORM 3D

O DEFORM 3D suporta modelos de propósitos especiais que simplificam as definições das operações e usam a linguagem de engenharia conhecida. Para aplicações de torneamento, a peça rotativa, o inserto e suas relações com o domínio de análise são mostrados na Figura 15. O modelo de análise típico gerado é mostrado na Figura 16. Os principais requisitos para modelar o processo de usinagem são os dados de tensão de fluxo de material para o material da peça e os dados geométricos para a pastilha.

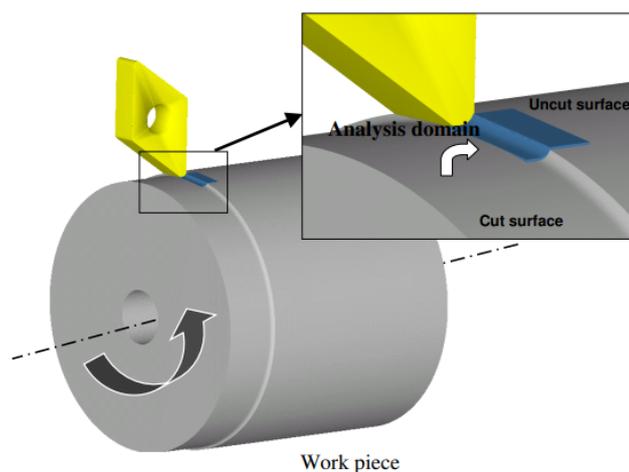


Figura 15 – Componentes básicos do torneamento e sua relação com o domínio de análise (DEFORM, 2010).

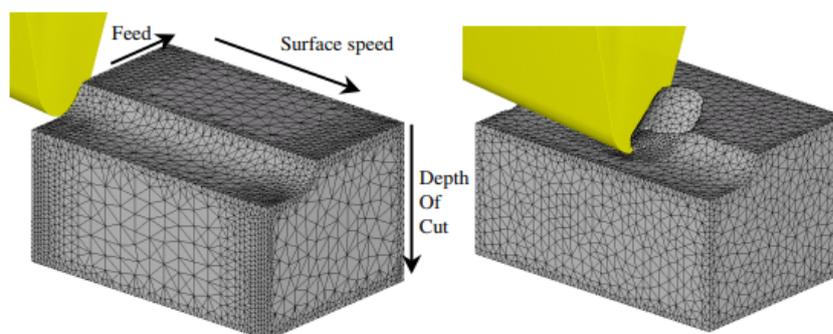


Figura 16 – Modelo de simulação e definição de parâmetros básicos de corte (DEFORM, 2010).

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve, primeiramente, sobre a modelagem da peça-ferramenta, atribuindo as propriedades mecânicas e físicas que irão influenciar diretamente na simulação. Além disso, é pormenorizado os procedimentos utilizados para o desenvolvimento das simulações no DEFORM 3D Ver 11.0 envolvendo o método de elementos finitos e os procedimentos para obtenção das rugosidades com o auxílio do Excel.

3.1 MATERIAIS DA PEÇA E DA FERRAMENTA

O material selecionado para a peça foi o Alumínio 6061 (nome AL6061_Machining no DEFORM 3D) devido a suas diversas aplicações na indústria, bem como sua boa usinabilidade e ductilidade, porém com apresentação de cavacos longos no torneamento, não proporcionando acabamentos satisfatórios muitas vezes, sendo então interessante para o estudo em questão. A Tabela 2 apresenta os parâmetros utilizados e, também, disponíveis na biblioteca do software. Já a tabela 3 elenca as propriedade químicas desse material.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas da peça.

Propriedade	Valor
Densidade	2,7 g/m ³
Módulo de Young	68,9 GPa
Coefficiente de Poisson	0,3
Condutividade térmica	180 W/m*K

Fonte: Biblioteca do DEFORM.

Tabela 3 – Propriedades químicas do Al6061.

Elemento	Teor presente
Mg	0,8 - 1,2%
Fe	0,7%
Cu	0,15 - 0,4%
Mn	0,15%
Al	96,05 - 99,00%
Si	0,4 - 0,8%
Zn	0,25%
Ti	0,15%

Fonte: [Metais \(2020\)](#).

Como o teor de Silício é baixo no Al6061, ferramentas de metal duro podem ser utilizadas sem problemas, logo a ferramenta selecionada foi do tipo DNMA432 de metal duro WC (carboneto de tungstênio) por oferecer boa dureza e tenacidade e estar disponível diretamente no DEFORM 3D. A Tabela 4 apresenta as propriedades mecânicas do material dessa ferramenta.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas da ferramenta.

Propriedade	Valor
Densidade	1,57 g/m ³
Módulo de Young	65 GPa
Coefficiente de Poisson	0,25
Condutividade térmica	59 W/m*K

Fonte: Biblioteca do DEFORM.

3.2 GEOMETRIA

A geometria da peça, utilizada para todas as simulações, foi gerada no próprio ambiente do pre-processador do DEFORM 3D utilizando o modelo simplificado com 15 mm de comprimento, a partir do qual a altura Z e a espessura X foram geradas automaticamente no Software de acordo com os parâmetros de corte, como mostra a Figura 17. Usufruidando da biblioteca do Software, o modelo de inserto para a ferramenta foi do tipo DNMA432, que apresenta o aspecto e as medidas mostradas na Figura 18 e na Tabela 5 respectivamente.

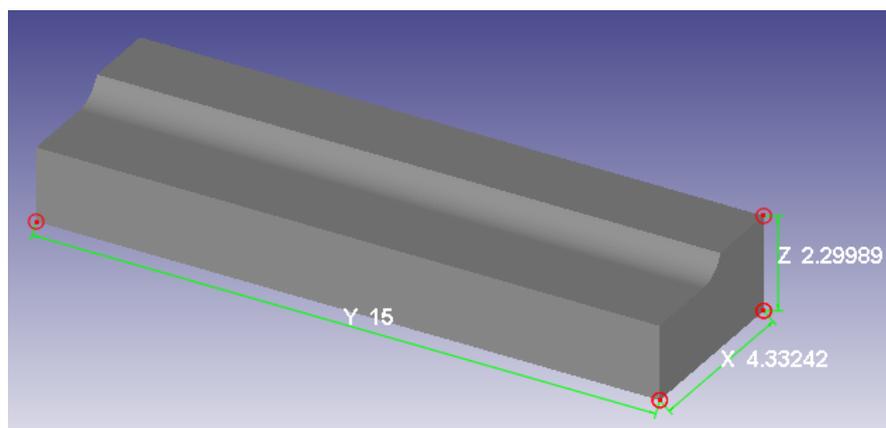


Figura 17 – Geometria da peça no domínio de análise (Autor, 2022).

Dentre os portas-ferramenta adequados e disponíveis no DEFORM para essa pastilha específica, o escolhido foi do tipo DDJNR432 por apresentar por apresentar angulações próximas a zero, de acordo com a Tabela 6.

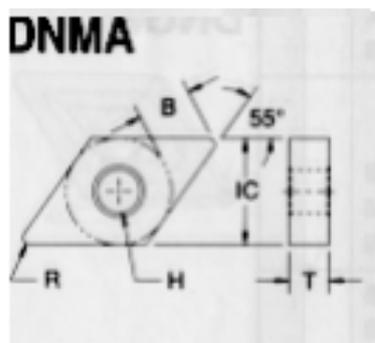


Figura 18 – Aspecto e geometria da pastilha DNMA432 (DEFORM, 2010).

Tabela 5 – Geometria da pastilha DNMA432

Medida	Símbolo	Valor (mm)
Diâmetro do círculo inscrito	IC	12,7
Espessura	T	4,7625
Raio de ponta	R	0,8
Comprimento efetivo da aresta de corte	B	6,447
Diâmetro do furo de fixação	H	5,1562

Fonte: Biblioteca do DEFORM.

Tabela 6 – Ângulos do porta-ferramenta DDJNR432.

Ângulo	Valor
SCEA	-3
BR	-5
SR	-5

Fonte: Biblioteca do DEFORM.

3.3 CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO DAS SIMULAÇÕES

Para todas as simulações empregou-se temperatura ambiente de 20°, coeficiente de convecção de 0.02 N/sec/mm/C, coeficiente de transferência de calor e fator de atrito de cisalhamento entre a interface peça-ferramenta de 45 N/sec/mm/C e 0.6 respectivamente. Nenhuma configuração para inserção de fluidos de corte foi encontrada, portanto os experimentos foram considerados a seco. O comprimento de corte adotado foi de 6 mm, por ser suficiente para as análises de rugosidade.

Ademais, com o intuito de identificar as melhores condições de corte para se obter o melhor acabamento superficial, 4 simulações foram realizadas no DEFORM-3D alterando-se apenas a velocidade de corte, a profundidade de corte e o avanço de acordo com a Tabela 7.

Tabela 7 – Condições utilizadas em cada simulação

Número da simulação	Velocidade de corte (m/min)	Profundidade de corte (mm)	Avanço (mm/rev)
1	250	0,3	0,1
2	500	0,3	0,1
3	250	0,3	0,3
4	250	0,5	0,1

Fonte: Autor, 2022.

3.4 MALHAS E CONDIÇÕES DE CONTORNO

Partindo do princípio de que quanto mais refinada a malha, maior a qualidade e precisão dos resultados, porém maior o custo computacional, a malha estabelecida para a peça de trabalho foi do tipo absoluta, na qual o tamanho do elemento deve ser especificado. Para a escolha do tamanho do menor elemento, a espessura do cavaco não cortado serve como base, aplicando-se uma fração do avanço. [Deform \(2010\)](#) destaca que o ideal seria ter 4/5 ou mais elementos na espessura do cavaco não cortado, todavia, para este trabalho desejam-se simulações que sejam executadas um pouco mais de rapidez, portanto, o tamanho mínimo adotado foi de 1/4 do menor avanço, ou 0,075. Além disso, aplicou-se o valor 7 para a proporção de tamanho (*size ratio*) gerando uma malha com 172933 elementos e 38149 nós, apresentada na Figura 19.

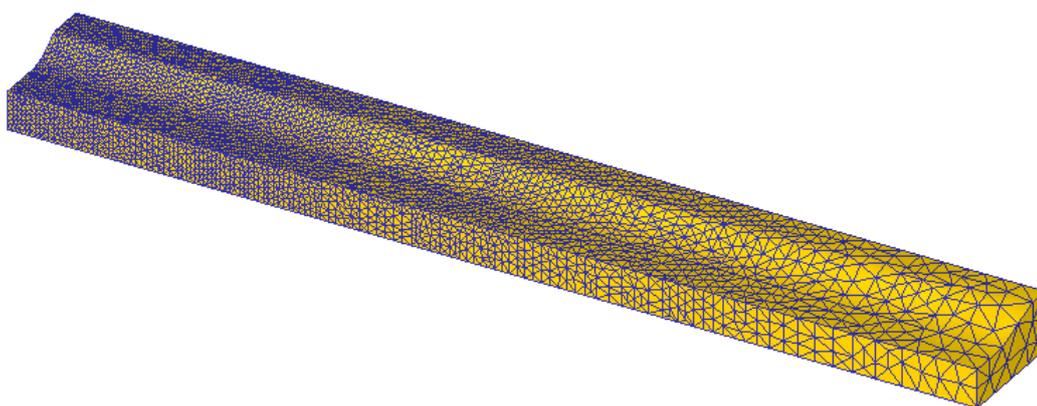


Figura 19 – Malha gerada para a peça de trabalho (Autor, 2022).

Como a malha não é tão crítica na ferramenta quanto na peça de trabalho optou-se por especificações que otimizassem o tempo das simulações mas que ainda proporcionassem resultados realistas, portanto, a malha foi do tipo relativa com proporção de tamanho de 7 e aproximadamente 20000 elementos, sendo que, para simulações realistas, de 20 a 40.000 elementos na ferramenta é razoável. A malha gerada apresentou 33243 elementos e 7633 nós e está ilustrada na Figura 20.

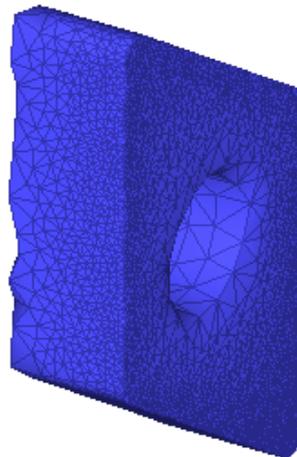


Figura 20 – Malha gerada para a ferramenta (Autor, 2022).

Após a geração das malhas, as condições de contorno padrão foram designadas, sendo portanto atribuída a troca com ambiente a todas as superfícies para os cálculos térmicos e de difusão. Em relação ao movimento, a peça de trabalho é fixada nos três eixos, enquanto a ferramenta se moverá de acordo com as condições de processamento.

3.5 TEORIA UTILIZADA NO DEFORM

O método de interação utilizado foi o método de Newton-Raphson, por ser recomendado para a maioria dos problemas pois geralmente converge em menos iterações que os outros métodos disponíveis. O tipo de objeto define se e como a deformação é modelada para cada objeto individual em um problema no DEFORM, nesse estudo, a peça foi definida como elasto-plástica, já que esse tipo fornece uma simulação realista de recuperação elástica (*springback*) e deformações devido à expansão térmica. Objetos elasto-plásticos são tratados como objetos elásticos até que o limite de escoamento seja alcançado. Então, quaisquer partes do objeto que atingirem o limite de escoamento são tratadas como plásticas, enquanto o restante do objeto é tratado como elástico. Na deformação elasto-plástica, a deformação total no objeto é uma combinação de deformação elástica e não elástica. A deformação não elástica consiste em deformação plástica, deformação por fluência, deformação térmica e deformação de transformação dependendo das características dos materiais (FLUHRER, 2010).

Em relação a solução por MEF, o próprio software cria uma auto refinação de malha, determinando o local que deva possuir o melhor refinamento de malha. Adicionalmente, o software utiliza de uma malha adaptativa com uma formulação Lagrangeana de integração explícita no tempo com análise transiente. Neste método a malha se move com o material, mantendo o refinamento confinado ao local. Isto é, o nível de refinamento

não é perdido assim que a peça se movimenta, pois a malha acompanha este movimento sendo reconstruída à medida que as interações entre ferramenta e peça acontecem, o que proporciona qualidade nos resultados do início ao fim (FLUHRER, 2010).

3.6 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE

A rugosidade foi analisada, após as simulações, na parte usinada da superfície da peça a partir da realização de um corte longitudinal no plano YZ na origem dos planos X, Y e Z com a ferramenta "*Slicing*" do Pós-processador. A ferramenta permite a exportação da imagem gerada na forma de pontos que então foram importados para o Excel e usados para geração gráfica da imagem em 2D, do perfil de rugosidade, da linha média e da rugosidade média R_a .

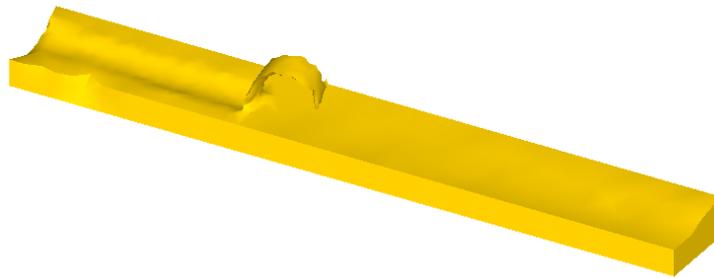
A linha média foi calculada como a média das coordenadas em Z da peça no comprimento de avaliação e a rugosidade R_a como a média dos módulos das coordenadas em Z da peça no comprimento de avaliação em relação a linha média. A partir desse cálculo direto, a rugosidade média é dada em mm, entretanto, como a unidade usual para essa medida é o μm , tornou-se necessário realizar a conversão multiplicando-se os resultados por 1000.

O comprimento de amostragem considerado foi de 0,8 mm e conseqüentemente o comprimento de avaliação foi de 4 mm, sendo descartado o primeiro 1 mm de comprimento da peça em todas as simulações para garantir menor interferência de possíveis erros gerados no software quando o mesmo inicia a simulação.

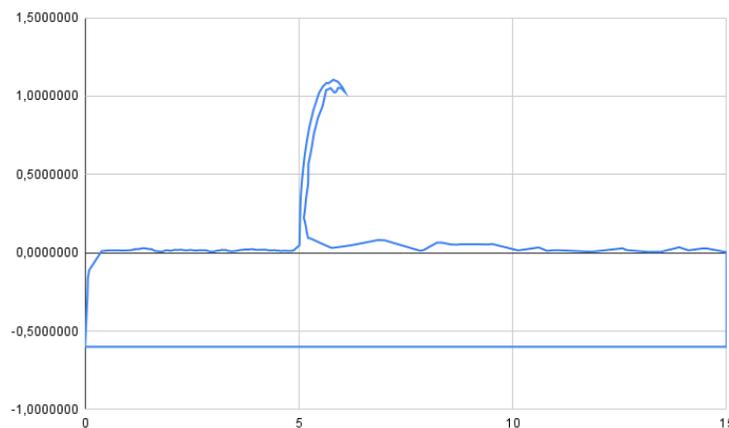
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados das simulações realizadas nas condições descritas na metodologia, bem como a superfície 2D gerada com a ferramenta de "slicing" e os perfis de rugosidade obtidos no Excel para o comprimento de avaliação selecionado. Os resultados das simulações juntamente com as peças geradas em 2D no Excel estão presentes nas Figuras 21,22,23 e 24. Os perfis estão ilustrados na Figura 25, na qual os eixos horizontais apresentam o comprimento da peça (em mm) e os eixos verticais abordam a altura (em mm) dos pontos retirados da superfície usinada.

A Tabela 8 destaca os valores de R_a obtidos através da média aritmética das alturas desses pontos das superfícies no comprimento analisado de acordo com os parâmetros de corte aplicados. Para que esses valores fossem apresentados em μm , multiplicou-se a média aritmética por 1000. Ademais, ao final deste capítulo, elencam-se as discussões sobre como as condições aplicadas afetaram o acabamento superficial da peça.



(a) Visão global no Deform 3D.



(b) Peça em 2D gerada no Excel.

Figura 21 – Resultados obtidos para a Simulação 1 ($V_c = 250$ m/min; $a_p = 0,3$ mm; $f = 0,1$ mm/rot) (Autor, 2022).

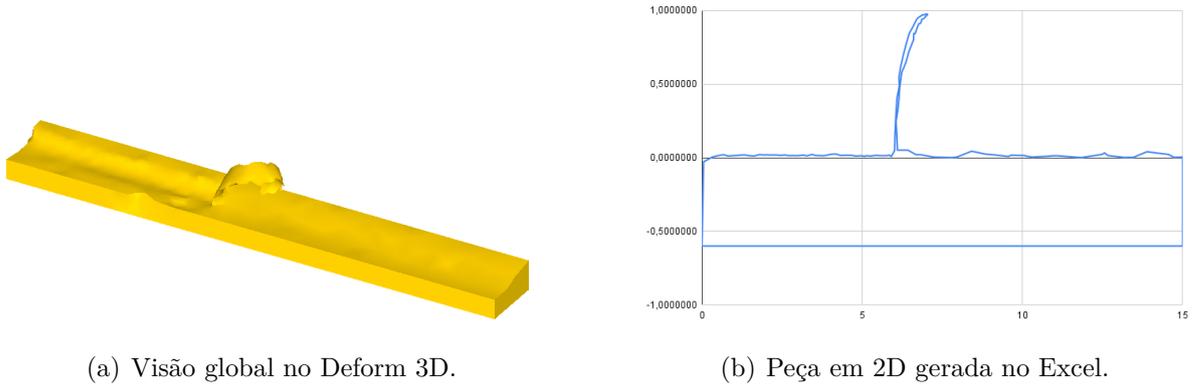


Figura 22 – Resultados obtidos para a Simulação 2 ($V_c = 500$ m/min; $a_p = 0,3$ mm; $f = 0,1$ mm/rot) (Autor, 2022).

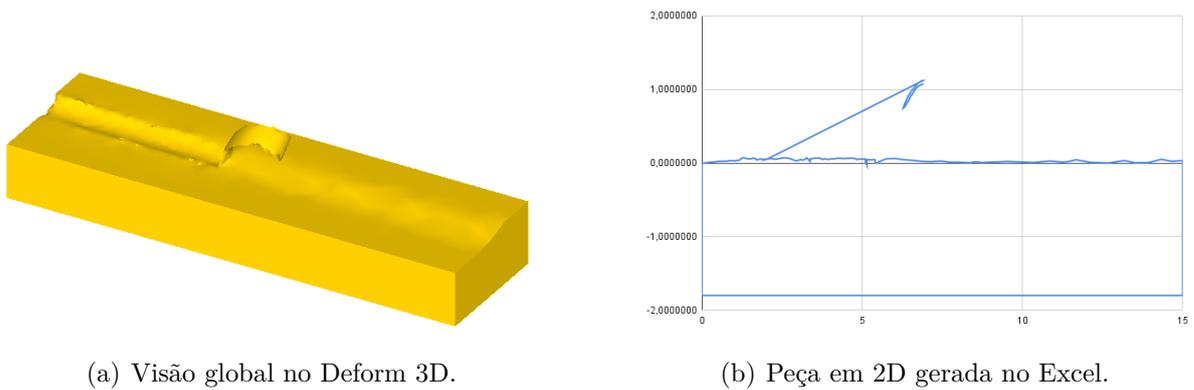


Figura 23 – Resultados obtidos para a Simulação 3 $V_c = 250$ m/min; $a_p = 0,3$ mm; $f = 0,3$ mm/rot) (Autor, 2022).

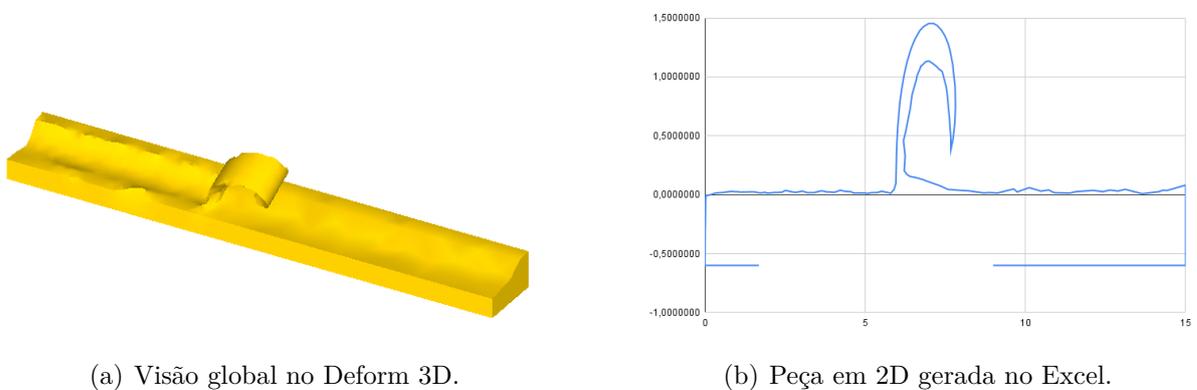


Figura 24 – Resultados obtidos para a Simulação 4 $V_c = 250$ m/min; $a_p = 0,5$ mm; $f = 0,1$ mm/rot) (Autor, 2022).

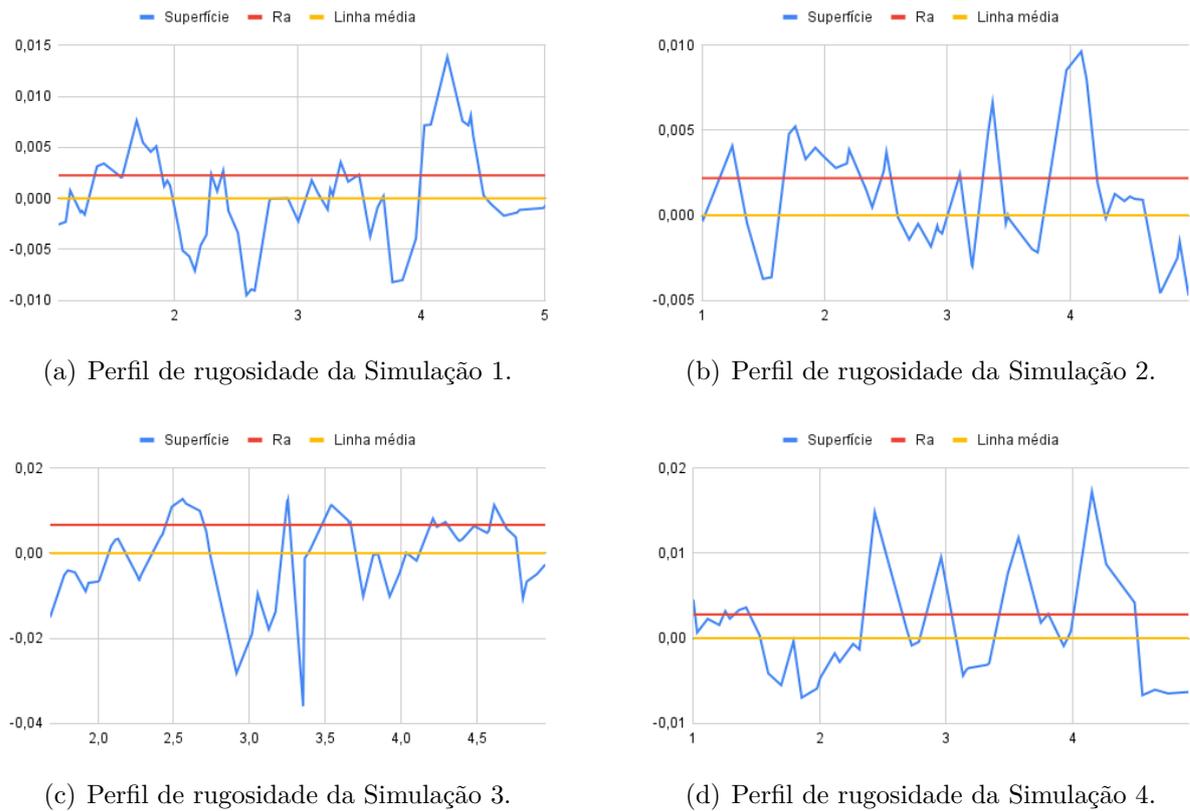


Figura 25 – Perfis de rugosidade, linha média e Ra obtidos no Excel (Autor, 2022).

Tabela 8 – Características de cada simulação e valores de R_a obtidos.

Número da simulação	Velocidade de corte (m/min)	Profundidade de corte (mm)	Avanço (mm/rev)	Rugosidade R_a (μm)
1	250	0,3	0,1	2,2518
2	500	0,3	0,1	2,1816
3	250	0,3	0,3	6,6679
4	250	0,5	0,1	2,8185

Fonte: Autor, 2022.

Avaliando os desenhos 2D gerados no Excel é possível observar a falta de precisão dos pontos após o comprimento de 6 mm torneado. Isso ocorre pois o DEFORM não considera importante caracterizar corretamente essa seção da peça. Além disso, o traço bruscamente incorreto presente na Figura 23 (b), se deu pelo fato do cavaco ter se enrolado mais e conseqüentemente as coordenadas dos pontos começam a se confundir. Todavia, esse erro não afetou a medição da rugosidade.

Em relação as visões globais apresentadas, nota-se uma diferença de largura e espessura entre as peças, porém todas possuem o mesmo comprimento de 15 mm. Como as geometrias foram geradas no próprio ambiente do Pre-processador do DEFORM, não foi

possível identificar exatamente como a alteração do Avanço, da Velocidade e profundidade de corte modificou cada geometria.

O perfil de rugosidade teórico é a combinação do avanço com o raio de ponta da ferramenta, onde o aumento do avanço tem efeito geométrico por contribuir para o aumento da distância entre picos, no perfil de rugosidade, conseqüentemente aumentando o valor da amplitude de rugosidade. Esse efeito, infelizmente, não fica tão evidente nos perfis gerados da Figura 25 já que a análise está sendo feita utilizando-se de cortes longitudinais no plano YZ.

A Tabela 8, por sua vez, mostra que, como esperado, o avanço foi o parâmetro mais influente na rugosidade, fazendo com que a mesma quase triplicasse para o seu triplo (Simulação 3 em relação a Simulação 1). Entretanto, esperava-se que o aumento da velocidade de corte também reduzisse significativamente a rugosidade média, o que não ocorreu, mas isso pode ser explicado visto que, quando as velocidades já são suficientemente altas, pouca alteração na rugosidade pode ser prevista. Por fim, a profundidade de corte, apesar de pequena em ambos os casos, aumentou o valor de R_a quando aumentada.

Cabe ainda destacar que o custo computacional demandado para cada simulação foi em torno de 5 horas, sendo um tempo aceitável. Entretanto, houveram falhas onde as soluções não convergiram ou pararam devido ao formato ruim do elemento (*Program stopped because of bad element shape!*) que causaram um custo computacional adicional, pois tiveram que ser refeitas até serem concluídas com sucesso.

5 Conclusão

A partir das 4 simulações efetuadas no DEFORM 3D é possível verificar a combinação ótima de parâmetros de maquinagem para minimizar a rugosidade superficial. Assim sendo, a melhor combinação foi: $V_c = 500$ m/min, $f = 0,1$ mm/rot e $a_p = 0,3$ mm, correspondente a simulação 2. Este ensaio apresenta o menor valor de rugosidade superficial média $R_a = 2,1816$ μm devido a sua velocidade de corte suficientemente alta e baixo avanço e profundidade de corte.

Nesse contexto, cabe ressaltar que a vantagem prática de se trabalhar com avanços mais altos é a redução significativa no tempo de produção, em contrapartida, consequentemente ocorre uma piora na qualidade do produto. Dessa forma, o ideal consiste em verificar os requisitos de acabamento superficial solicitados para o projetos e daí utilizar o maior avanço possível para atendê-los.

Em suma apesar do software DEFORM já se mostrar uma solução para a indústria desde análises de temperatura a deformações, o mesmo não apresenta parâmetros de análises bem definidos, nem uma interface de fácil compreensão e tão pouco muitos tutoriais disponíveis. Não foi possível caracterizar nesse trabalho quais as diretrizes seguidas para definição da largura e espessura da geometria gerada automaticamente no software e consequentemente a influência desta na rugosidade. Além disso, os pontos gerados para a peça em 2D foram poucos, diminuindo assim a confiabilidade do desenho. Portanto, outros softwares de usinagem podem se mostrar mais interessantes para o tipo de estudo apresentado.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

1. Realização de número vasto de simulações alterando os parâmetros em questão com o intuito de entender melhor a preponderância de cada parâmetro;
2. Aplicação dos estudos teóricos e computacionais aqui realizados em experimentos físicos com as mesmas condições, afim de realizar comparações dos resultados e apresentar uma discussão acerca da margem de erro;
3. Investigação da rugosidade em outros softwares CAE nas mesmas condições de usinagem para análise de confiabilidade e precisão entre os mesmos;
4. Estudo mais aprofundado da influencia da geometria da pastilha e dos ângulos do porta-ferramenta no acabamento superficial do Alumínio 6061;

Referências

- ABAL. Fundamentos e aplicações do alumínio. Associação Brasileira do Alumínio - São Paulo, 2007. Citado na página 3.
- ABAL. Alumínio brasileiro: Soluções para uma vida sustentável. Associação Brasileira do Alumínio - São Paulo, 2017. Citado na página 1.
- AGOSTINHO, O. L. *Engenharia de Fabricação Mecânica*. 1. ed. Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier Editora Ltda., 2018. Citado na página 16.
- BECKER, S. F. et al. Contribuições para aplicação das normas atualizadas de rugosidade. VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 7, 17 e 18.
- BONIFACIO, M. E. R. *Monitoramento do Processo de Torneamento de Acabamento Via Sinais de Vibração*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, 1983. Citado na página 21.
- CUNHA, E. A. da; RIBEIRO, M. V. Influência da velocidade de corte na rugosidade em usinagem de ligas de alumínio. Congresso Brasileira de Engenharia de Fabricação, 2003. Citado na página 21.
- DEFORM. *DEFORM™-3D Machining (turning) Lab*. Biblioteca do DEFORM - 2D/3D Ver 11.0: DEFORM, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 7, 24, 27 e 28.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. São Paulo, Brasil: Editora MM, 1999. Citado 3 vezes nas páginas 3, 16 e 20.
- EEEP. *Curso Técnico em Mecânico: Processos de Fabricação Mecânica*. 2021. Governo Estadual do Ceará - Secretaria da Educação. Disponível em: <<https://www.infolivros.org/pdfview/819-processo-de-fabricacao-mecanica-educacao-profissional/>>. Acesso em: 23.9.2022. Citado na página 4.
- ELMELIGY, M. A. *CHAPTER TWO: Fundamentals of Metal Cutting*. Apresentação em PDF: [s.n.], 2016. Disponível em: <https://faculty.ksu.edu.sa/sites/default/files/03_-_fundamentals_of_metal_cutting_sanwar_feb15_16.pdf>. Acesso em: 20.7.2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 11.
- FERRARESI, D. *Fundamentos da usinagem dos metais*. E-book. ISBN 9788521214199: Editora Blucher, 1970. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521214199/>>. Acesso em: 29.8.2022. Citado 4 vezes nas páginas 7, 10, 11 e 12.
- FERRARESI, D. *Fundamentos da usinagem dos metais*. 5. ed. [S.l.]: Editora Blucher, 1977. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 15.
- FILHO, A. A. *Elementos Finitos - A Base da Tecnologia CAE*. 6. ed. E-book. 9788536519708.: Editora Saraiva, 2009. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536519708/>>. Acesso em: 29.8.2022. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

FLUHRER, J. *DEFORM 2D Version 8.1 User's Manual*. Columbus, Ohio: Scientific Forming Technologies Corporation, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 22, 29 e 30.

KIKUKAWA, K. J. et al. Análise do processo de torneamento em relação a rugosidade superficial do aço 1010. *Revista Engenharia em Ação - Uniletoledo, SP*, 2019. Citado na página 16.

MACHADO Álisson R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T. *Teoria da usinagem dos materiais*. 3. ed. E-book. ISBN 9788521208440.: Editora Blucher, 2015. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521208440/>>. Acesso em: 29.8.2022. Citado 6 vezes nas páginas 7, 6, 10, 12, 13 e 20.

MACHADO Álisson R. et al. *Teoria da usinagem dos metais*. 1. ed. [S.l.]: Editora Blucher, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 9.

MACHADO Álisson R.; SILVA, M. B. da. *Usinagem dos metais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, LEPU - Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, 4 2004. Apostila. Citado na página 15.

METAIS, I. dos. *ALUMÍNIO 6061-T6/T651*. 2020. Disponível em: <<https://www.imperiodosmetais.com.br/aluminio-6061-t6>>. Acesso em: 23.9.2022. Citado na página 25.

NEVES, S. *Curiosidades da área de Mecânica: Torno mecânico*. 2017. Disponível em: <<https://www.cemeq.ufg.br/n/97461-curiosidades-da-area-de-mecanica>>. Acesso em: 23.9.2022. Citado na página 1.

RODRIGUES, A. R.; JASINEVICIUS, R. G. *AULA 1: ESTADO DE SUPERFÍCIE*. Apresentação em PDF: USP, 2018. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4187111/mod_resource/content/2/Teórico/>. Acesso em: 20.8.2022. Citado na página 18.

SANDVIK. *Corokey: FÁCIL DE ESCOLHER, FÁCIL DE USAR*. Catálogo: Sandvik Coromant, 2010. Disponível em: <https://kupdf.net/download/corokey2010pdf_5ae01ac6e2b6f5a00441cc7d_pdf>. Acesso em: 20.8.2022. Citado 3 vezes nas páginas 7, 14 e 40.

SANDVIK. *Torneamento Geral: Como escolher sua ferramenta para torneamento*. Catálogo: Sandvik Coromant, 2010. Disponível em: <<http://www.grima.ufsc.br/cnc/transparencias/SandvikTorneamentoGeral1.pdf>>. Acesso em: 20.8.2022. Citado na página 4.

SANDVIK. *Materiais da peça*. 2022. Sandvik Coromant do Brasil S.A. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>>. Acesso em: 23.9.2022. Citado na página 4.

SECCO, A. R.; FILHO, D. do A.; OLIVEIRA, N. C. de. *Curso Profissionalizante - Processos de fabricação - Volumes I,II,III,IV*. São Paulo, Brasil: Editora Globo S.A., 1997. Citado 6 vezes nas páginas 7, 4, 5, 6, 19 e 20.

SOUZA, I. G. de. *Processo de torneamento do aço abnt 4340 utilizando ferramenta de metal duro com revestimento de $ti(c,n)+al_2o_3+tin$* . Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá: [s.n.], 2017. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 9.

VALIM, D. B. *Usinagem*. E-book. ISBN 9788595025110: Grupo A, 2018. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595025110/>>. Acesso em: 29.7.2022. Citado 3 vezes nas páginas 7, 18 e 19.

Anexos

ANEXO A – Chave de código para pastilhas e suportes

1. FORMATO DA PASTILHA						2. ÂNGULO DE FOLGA DA PASTILHA																
80° C	55° D	R	S	T	35° V	80° W	0° B	7° C	0° N													
4. TIPO DE PASTILHA			5. TAMANHO DE PASTILHA = COMPRIMENTO DA ARESTA DE CORTE																			
A	G	M	T																			
				<i>l</i> mm: 06–19 07–15 06–12 09–19 06–22 11–16 06–08																		
7. RAIOS DE PONTA																						
	04	$r_c = 0.4$	Recomendações de primeira escolha para o raio de ponta: <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>T-MAX P</th> <th>CoroTurn 107</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ACABAMENTO</td> <td>08</td> <td>04</td> </tr> <tr> <td>USINAGEM MÉDIA</td> <td>08</td> <td>08</td> </tr> <tr> <td>DESBASTE</td> <td>12</td> <td>08</td> </tr> </tbody> </table>									T-MAX P	CoroTurn 107	ACABAMENTO	08	04	USINAGEM MÉDIA	08	08	DESBASTE	12	08
	T-MAX P	CoroTurn 107																				
ACABAMENTO	08	04																				
USINAGEM MÉDIA	08	08																				
DESBASTE	12	08																				
	08	$r_c = 0.8$																				
	12	$r_c = 1.2$																				
	16	$r_c = 1.6$																				
	24	$r_c = 2.4$																				
8. GEOMETRIA – OPÇÃO DO FABRICANTE																						
<p>O fabricante pode incluir mais dois símbolos ao código, para descrever a geometria da pastilha, por exemplo:</p> <p>-PF = ISO P Acabamento</p> <p>-MR = ISO M Desbaste</p>																						
B. SISTEMA DE FIXAÇÃO																						
D	M	P	S																			
Fixação rígida (RC)	Fixação por cunha-grampo	Fixação por alavanca	Fixação por parafuso																			
D. VERSÃO DA FERRAMENTA	E. ALTURA DA HASTE	G. COMPRIMENTO DE FERRAMENTA																				
R		Comprimento da ferramenta = l_1 em mm																				
Versão direita																						
L	F. LARGURA DA FERRAMENTA	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>H = 100</td> <td>S = 250</td> </tr> <tr> <td>K = 125</td> <td>T = 300</td> </tr> <tr> <td>M = 150</td> <td>U = 350</td> </tr> <tr> <td>P = 170</td> <td>V = 400</td> </tr> <tr> <td>Q = 180</td> <td>W = 450</td> </tr> <tr> <td>R = 200</td> <td>Y = 500</td> </tr> </tbody> </table>									H = 100	S = 250	K = 125	T = 300	M = 150	U = 350	P = 170	V = 400	Q = 180	W = 450	R = 200	Y = 500
H = 100	S = 250																					
K = 125	T = 300																					
M = 150	U = 350																					
P = 170	V = 400																					
Q = 180	W = 450																					
R = 200	Y = 500																					
Versão esquerda																						
N																						
Neutra																						

Fonte: Sandvik (2010a).