



Miguel Antero Pangaio Pereira **Simulação Numérica por Elementos Finitos da
Maquinagem de Aços para Moldes.**



**Miguel Antero
Pangaio Pereira**

**Simulação Numérica por Elementos Finitos da
Maquinagem de Aços para Moldes.**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Project No. 031556-FCT/02/SAICT/2017; FAMASI-Sustainable and intelligent manufacturing by machining, financiada by the Foundation for Science and Technology (FCT), POCI, Portugal, in the scope of TEMA, Centre for Mechanical Technology and Automation - UID/EMS/00481/2013.

Dedico este trabalho à minha Família que sempre me deu todo o apoio necessário para alcançar este objetivo, aos meus amigos que me acompanharam neste percurso e a todos os professores que me deram os conhecimentos necessários para um futuro como Engenheiro Mecânico.

o júri

presidente

Prof. Doutor Robertt Angelo Fontes Valente
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa
Professor Associado da Universidade de Lisboa

Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Ao professor Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, orientador, pela disponibilidade e tempo investido no exercício de orientação deste trabalho.

À Sílvia Daniela Ribeiro Carvalho pelo apoio permanente na elaboração deste trabalho.

Aos meus pais, Maria Eugénia Ferreira Pangaio e João António Silva Pereira, e irmã, Joana Pangaio Pereira, pelo apoio, investimento e fé em mim, no meu esforço e no meu trabalho.

palavras-chave

Maquinagem; maquinabilidade; simulação numérica por elementos finitos; corte ortogonal; aços.

resumo

O presente trabalho, contempla a simulação numérica por elementos finitos da maquinagem de três tipos de aços para moldes, nomeadamente AISI 1045, AISI D2 e AISI H13, e, no caso do aço AISI 1045, posterior validação das previsões a partir de dados obtidos por meio experimental, disponibilizados na literatura. Foram escolhidos estes aços por serem bastante utilizados na indústria dos moldes, uma área com uma enorme importância na produção industrial dos tempos atuais.

A maquinabilidade destas ligas foi estudada através das forças e temperaturas de corte, taxa de compressão da apanha, potência de corte e deformação angular, recorrendo a resultados numéricos obtidos por FEM.

Foram realizados ensaios de corte ortogonal em 2D e, relativamente ao software utilizado, o AdvantEdge® é uma ferramenta bastante vantajosa na previsão do comportamento destas variáveis durante o processo de corte.

Posteriormente à recolha dos dados numéricos, estes foram tratados, analisados e comparados com a literatura. Para o efeito, recorreu-se à análise gráfica, mapas de distribuição de temperaturas e técnicas de medição do software.

Na parte da validação dos resultados numéricos, obtiveram-se valores bastante satisfatórios no que diz respeito à aproximação aos resultados experimentais consultados na literatura.

Os aços foram ainda comparados entre si, com a finalidade de conhecer qual dos aços apresentou uma melhor maquinabilidade.

keywords

Machining; machinability; finite elements modeling analysis; orthogonal cutting; steels.

abstract

The present dissertation comprises the numerical simulation by finite element analysis of the machining process of three steels for molds, namely AISI 1045, AISI D2 and AISI H13, and in the particular case of the AISI 1045 steel, the results were compared with experimental machining trials reported in the literature.

These steels were chosen due to their widely use in the mold industry, na área with enormous importance in industrial production nowadays.

The machinability of these alloys was studied through the cutting forces, temperatures and power, chip compression ratio and angular deformation, using numerical data obtained by FEM. 2D orthogonal cutting tests were performed and, regarding the software used, the AdvantEdge® is a very usefull tool in behavior prediction of those variables during the cutting process.

After the numerical data was rewarded, it was treated, analysed and compared with the literature. For this purpose, graphic analysis, temperature distribution maps and measurement software techniques were used.

In the numerical results validation topic, very satisfactory values has been obtained related to the approximation to the experimental results consulted in the literature.

The steels were also compared with each other, with the purpose of knowing which one of them presented a better machinability.

Índice

Índice de figuras	2
Índice de tabelas.....	5
Nomenclatura.....	6
Abreviaturas	8
1. Introdução	10
1.1. Enquadramento	10
1.2. Objetivos	10
2. Revisão bibliográfica – Um estado de arte da simulação numérica do corte ortogonal de aços	16
2.1. Contextualização	16
2.2. Composição química.....	17
2.3. Tratamentos térmicos	18
2.4. Maquinabilidade dos aços	19
2.5. Corte por arranque de apara – Simulação e corte ortogonal	21
2.6. Parâmetros de corte	23
2.7. Ferramentas de corte	25
2.8. Fluidos de corte	27
2.9. Forças, temperaturas e potência de corte.....	30
2.10. Grau de recalque e deformação angular	35
2.11. Síntese.....	35
3. Metodologia – Simulação numérica da maquinagem por elementos finitos – Advantedge®	38
3.1. Aspectos gerais	38
3.2. Análise FEM – Modelo de Johnson-Cook	42
3.3. Introdução dos dados da simulação	43
3.3.1. Criação de um projeto	43
3.3.2. Definição da peça	43
3.3.3. Definição da ferramenta de corte	45
3.3.4. Definição dos parâmetros e condições de corte	46
3.3.5. Definição dos parâmetros de simulação	48
3.4. Recolha dos resultados e validação - Tecplot®	49
3.4.1. Forças e temperaturas de corte	50
3.4.2. Tensões de corte residuais	52
3.4.3. Grau de recalque e deformação angular	54
4. Análise e discussão dos resultados obtidos	56
4.1. Aço AISI 1045	56
4.2. Aço AISI D2	65
4.3. Aço AISI H13.....	73
4.4. Comparação da maquinabilidade dos materiais	83
5. Conclusão	88
5.1. Aço AISI 1045	88
5.2. Aço AISI D2	89
5.3. Aço AISI H13.....	90
5.4. Comparação da maquinabilidade dos materiais	90
5.5. Sugestões para trabalhos futuros	91

Índice de Figuras

Figura 1 - Fases estabelecidas do trabalho.	11
Figura 2 - Exemplo de distribuição da temperatura na apara, ferramenta e peça.....	12
Figura 3 - Variação das forças de corte e de avanço ao longo do tempo de maquinagem.	12
Figura 4 - Exemplo da medição da espessura da apara após o corte.	13
Figura 5 - Extração das forças de corte e de avanço, temperatura média e potência de maquinagem, utilizando o software Tecplot®	13
Figura 6 – Representação do corte ortogonal (Zinov'ev and Sole, 2004).	21
Figura 7 - Evolução das forças de corte ao longo do tempo para os diferentes tipos de lubrificação (Revuru <i>et al.</i> , 2018).	28
Figura 8 - Temperatura de corte em função da velocidade de corte para maquinagem a seco e MQL (Özbek and Saruhan, 2020).	29
Figura 9 - Comparação de valores experimentais e simulados (Mebrahitom, Choon and Azhari, 2017).	30
Figura 10 - Força de corte experimental em função a) da velocidade de corte e b) do avanço por dente da ferramenta (Zhang, Zhang and Li, 2017).	31
Figura 11 - Distribuição da temperatura no corte ortogonal do aço AISI 1045 (Grzesik, Bartoszuk and Nieslony, 2005).	32
Figura 12 - Influência dos diferentes parâmetros de corte nos valores da potência de corte (Bagaber e Yusoff, 2017).	34
Figura 13 - Fluxograma da arquitetura do Advantedge®.	40
Figura 14 - Definição do material da peça de acordo com o primeiro método.	44
Figura 15 - Definição das dimensões e do material da peça de acordo com o segundo método. ..	44
Figura 16 - Definição da geometria da ferramenta de corte para os casos 2D (software AdvantEdge®).	45
Figura 17 - Seleção do material da ferramenta (software AdvantEdge®).	46
Figura 18 - Introdução dos parâmetros de corte.	47
Figura 19 - Definição dos parâmetros de simulação no AdvantEdge®.	48
Figura 20 - Ambiente de trabalho do Tecplot®.	49
Figura 21 - Distribuição das temperaturas durante o processo de corte extraídos do Tecplot®. ...	50
Figura 22 - Forças de corte (Fx) e de avanço (Fy) ao longo do tempo extraídas do Tecplot®.	50
Figura 23 - Valores médios das forças de corte e de avanço, da temperatura e da potência de corte.	51
Figura 24 - Distribuição das temperaturas ao longo da face de ataque e/ou de incidência da ferramenta extraídas do Tecplot®.	51
Figura 25 - Análise individual de uma zona específica da face de ataque e/ou saída no Tecplot®. ...	52
Figura 26 - Zonas de análise das tensões residuais no Tecplot®.	53
Figura 27 - Distribuição das tensões residuais ao longo da profundidade da peça extraída do Tecplot®.	53
Figura 28 - Processo de medição da espessura da apara após o corte no Tecplot®.	54
Figura 29 - Comparação entre a força de corte obtida nas simulações e obtida experimentalmente por Ning e Liang (2018).	60

Figura 30 - Comparação entre a força de avanço obtida nas simulações e obtida experimentalmente por Ning e Liang (2018).	60
Figura 31 - Temperatura de corte média da simulação e temperatura de corte obtida experimentalmente por Ning e Liang (2018).	62
Figura 32 - Potência de corte dos vários processos de corte.	63
Figura 33 - Grau de recalque dos vários processos de corte.	64
Figura 34 - Deformação angular dos vários processos de corte.	64
Figura 35 - Forças de corte e de avanço em função do avanço da ferramenta, para cada velocidade de corte.	67
Figura 36 - Valores experimentais de Arsecularatne et al. (2006) e valores simulados das forças de corte em função do avanço da ferramenta, para as diferentes velocidades de corte.	68
Figura 37 - Valores experimentais de Arsecularatne et al. (2006) e valores simulados das forças de avanço em função do avanço da ferramenta, para as diferentes velocidades de corte.	69
Figura 38 – Valores numéricos da potência em função do avanço da ferramenta para as diferentes velocidades de corte.	70
Figura 39 – Valores numéricos da temperatura em função do avanço da ferramenta para as diferentes velocidades de corte.	70
Figura 40 - Distribuição da temperatura na ferramenta, peça e apara para as simulações com um avanço de 0.2 mm/rot e a) $V_c = 70$ m/min, b) $V_c = 95$ m/min e c) $V_c = 120$ m/min.	71
Figura 41 - Grau de recalque em função da velocidade de corte para os diferentes avanços da ferramenta.	72
Figura 42 - Deformação angular em função da velocidade de corte para os diferentes avanços da ferramenta.	73
Figura 43 - Força de corte em função da profundidade de corte para os diferentes avanços da ferramenta e para uma velocidade de corte de 140 m/min.	76
Figura 44 - Força de avanço em função da profundidade de corte para os diferentes avanços da ferramenta e para uma velocidade de corte de 140 m/min.	76
Figura 45 - Força de corte em função da profundidade de corte para os diferentes avanços da ferramenta e para uma velocidade de corte de 200 m/min.	77
Figura 46 - Força de avanço em função da profundidade de corte para os diferentes avanços da ferramenta e para uma velocidade de corte de 200 m/min.	77
Figura 47 - Potência em função da profundidade de corte para os diferentes avanços e para uma velocidade de corte de 140 m/min.	78
Figura 48 - Potência em função da profundidade de corte para os diferentes avanços e para uma velocidade de corte de 200 m/min.	79
Figura 49 - Temperatura em função da profundidade de corte para os diferentes avanços e para uma velocidade de corte de 140 m/min.	79
Figura 50 - Temperatura em função da profundidade de corte para os diferentes avanços e para uma velocidade de corte de 200 m/min.	80
Figura 51 - Grau de recalque em função do avanço da ferramenta para as diferentes profundidades de corte e velocidade de corte de 140 m/min.	81
Figura 52 - Grau de recalque em função do avanço da ferramenta para as diferentes profundidades de corte e velocidade de corte de 200 m/min.	81

Figura 53 - Deformação angular em função do avanço da ferramenta para as diferentes profundidades de corte e velocidade de corte de 140 m/min.	82
Figura 54 - Deformação angular em função do avanço da ferramenta para as diferentes profundidades de corte e velocidade de corte de 200 m/min.	82
Figura 55 - Força de corte para os diferentes materiais maquinados e condições de corte.	84
Figura 56 - Força de avanço para os diferentes materiais maquinados e condições de corte.	84
Figura 57 - Potência de corte para os diferentes materiais maquinados e condições de corte.	85
Figura 58 - Temperatura média de corte para os diferentes materiais maquinados e condições de corte.	86
Figura 59 - Grau de recalque dos processos de corte.	86
Figura 60 - Deformação angular dos processos de corte.	87

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Percentagens de cada elemento na composição dos aços (Ramada Aços, 2020).	17
Tabela 2 - Índices de maquinabilidade de alguns materiais metálicos (Gomes, 2013).	20
Tabela 3 - Condições de corte testadas em estudos anteriores.	24
Tabela 4 - Detalhes experimentais (Revuru <i>et al.</i> , 2018).	28
Tabela 5 - Detalhes de corte (Grzesik, Bartoszek and Nieslony, 2005).	32
Tabela 6 - Características do AdvantEdge™, Deform™ e Abaqus™ (Santos das Neves, 2010).	41
Tabela 7 - Literatura consultada.	56
Tabela 8 - Parâmetros de entrada do software FEM e dados experimentais utilizados nas simulações do aço AISI 1045.	57
Tabela 9 - Valores das variáveis que interferem com o modelo de Johnson-Cook.	58
Tabela 10 - Condições de corte utilizadas na simulação e por Ning e Liang (2018).	59
Tabela 11 - Resultados experimentais obtidos por Ning e Liang (2018), da simulação e os respectivos erros associados.	59
Tabela 12 - Resultados das temperaturas de corte obtidos nas simulações e obtidos experimentalmente por Ning e Liang (2018).	61
Tabela 13 - Parâmetros de entrada do software FEM e dados experimentais utilizados nas simulações do aço AISI D2.	65
Tabela 14 - Valores das variáveis que interferem com o modelo de Johnson-Cook.	66
Tabela 15 - Parâmetros de entrada do software FEM e dados experimentais utilizados nas simulações do aço AISI H13.	74
Tabela 16 - Valores das variáveis que interferem com o modelo de Johnson-Cook.	75
Tabela 17 - Condições de corte utilizadas.	83

Nomenclatura

α	Ângulo de ataque da ferramenta [°]
c	Capacidade calorífica específica [J / Kg°C]
γ	Ângulo de ataque ortogonal para o modelo de Coulomb [°]
ϵ	Deformação plástica
$\dot{\epsilon}$	Taxa de deformação plástica [s ⁻¹]
η	Eficiência da máquina-ferramenta
σ	Tensão de cedência [MPa]
a	Avanço [mm/rot]
a	Ângulo de ataque da ferramenta no software de simulação [°]
A	Tensão de cedência [MPa]
ap	Profundidade de corte [mm]
B	Módulo de elasticidade [MPa]
b	Ângulo de folga da ferramenta no software de simulação [°]
C	Sensibilidade à taxa de deformação
C	Carbono
Co	Cobalto
Cr	Crómio
doc	Profundidade de corte no software de simulação [mm]
e'	Espessura da apara após o corte [mm]
e	Espessura da apara antes do corte [mm]
f	Avanço da ferramenta [mm/rot]
Fa ^e	Força de avanço experimental [N]
Fa ^s	Força de avanço da simulação [N]
Fc	Força de corte [N]
Fc ^e	Força de corte experimental [N]
Fc ^s	Força de corte da simulação [N]
Fa, Ff	Força de avanço [N]
Fp	Força de penetramento
Fx	Força de corte medida no Tecplot® [N]
Fy	Força de avanço medida no Tecplot® [N]
h	Altura da peça [mm]

Kc	Força específica de corte (dependente do material)
L	Comprimento da peça [mm]
loc	Comprimento de corte no software de simulação [mm]
m	Coefficiente de amaciamento térmico
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
n	Coefficiente de endurecimento
Ni	Níquel
P	Fósforo
p	Profundidade de corte [mm]
Pc	Potência de corte [kW]
r	Raio da aresta de corte da ferramenta [mm]
Rc	Grau de recalque
S	Enxofre
Si	Silício
SS _d	Soma dos desvios quadrados
SS _T	Soma total dos desvios quadrados
T	Temperatura do material da peça [°C]
Temp ^e	Temperatura de corte experimental [°C]
Temp ^s	Temperatura de corte da simulação [°C]
T _{melt}	Temperatura de fusão do material da peça [°C]
T _{ref} ; T _{room}	Temperatura ambiente [°C]
μ	Coefficiente de atrito
V	Vanádio
Vc	Velocidade de corte [m/min]
V _{c60}	Velocidade de corte para 60 minutos de maquinagem
w	Largura da peça [mm]

Abreviaturas

AISI	American Iron and Steel Institute
CAD	Computer Aided Design
CBN	Cubic Boron Nitride
CVD	Chemical Vapor Deposition
FEM	Finite Element Model
HRC	Scale C of Hardness of Rockwell
ISO	International Organization for Standardization
JC	Johnson-Cook
MQCL	Minimum QuantityCooling Lubrification
MLQ	Minimum Quantity Lubrification
PCBN	Polycrystalline Cubic Boron Nitride
PCD	Polycrystalline Diamond
PVD	Physical Vapour Deposition

1. Introdução

1.1. Enquadramento

O presente trabalho foca-se no estudo da maquinabilidade de três ligas de aços para moldes: AISI 1045, AISI D2 e AISI H13.

Para a realização dos ensaios numéricos, recorreu-se ao corte ortogonal como processo de corte para o estudo das forças, temperaturas e potências de corte, grau de recalque e deformação angular.

Os modelos de elementos finitos são uma ferramenta muito importante na previsão do comportamento do material quando sujeito a condições de maquinagem, e são amplamente utilizados para calcular as distribuições de tensão, deformação, taxa de deformação e temperatura nas zonas de corte (Grzesik, Bartoszek and Nieslony, 2005).

É também apresentada uma visão geral do software e das suas funcionalidades, a forma como os resultados são extraídos e funções bastante vantajosas para ajudar a dar continuidade ao trabalho realizado nesta dissertação.

Nos dias de hoje, o fabrico de moldes é um mercado bastante competitivo e desafiador no desenvolvimento de produtos. As empresas estão sob constante pressão para evoluir lado a lado com o desenvolvimento de novas tecnologias de produção e manter a qualidade dos seus produtos (Lyu *et al.*, 2006).

Com este estudo pretende-se conhecer o comportamento mecânico dos materiais sujeitos ao processo de maquinagem, verificar que aço apresenta uma melhor maquinabilidade tendo em conta as variáveis estudadas e testar as ferramentas de modo a saber qual se adequa melhor ao material e condições de corte.

1.2. Objetivos

O objectivo deste trabalho consiste na simulação numérica de testes de maquinagem de aços para moldes recorrendo a um software comercial de simulação por elementos finitos, o AdvantEdge®. Numa primeira fase é feita a revisão bibliográfica do estado da arte como forma de conhecer o desenvolvimento feito até hoje na área da maquinagem dos aços para moldes. Na segunda fase recolhem-se os dados existentes na literatura, resultantes de trabalhos experimentais já realizados, os quais são objeto de análise.

A terceira fase tem como fim a execução de testes em condições similares aos da literatura, usando o software de simulação AdvantEdge®. Com a replicação dos parâmetros de maquinagem no software, pretende-se obter as respostas termomecânicas durante o processo de maquinagem.

Posteriormente na fase quatro, é feita a análise dos resultados obtidos na terceira fase e, para o aço AISI 1045, é feita a comparação entre os valores simulados e os experimentais, onde sua apreciação permitirá tirar conclusões acerca do desempenho do software. Na Figura 1 estabeleceram-se as quatro fases mencionadas.

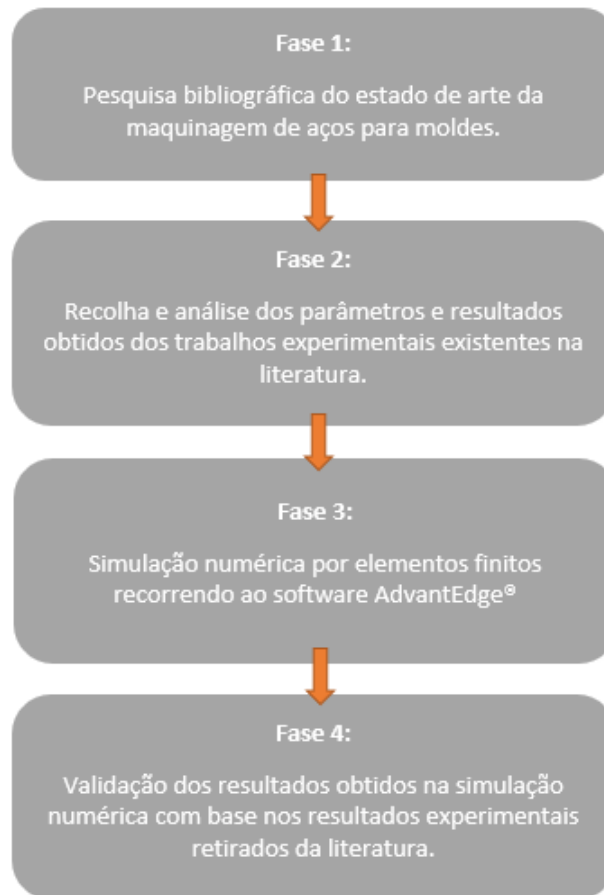


Figura 1 - Fases estabelecidas do trabalho.

Neste trabalho dá-se ênfase ao corte ortogonal, onde o estudo das respostas termomecânicas é feito através do software AdvantEdge®, (ver Figuras seguintes) pela extração de parâmetros como a distribuição da temperatura na apara e na ferramenta, as forças de corte, a potência de corte, as tensões residuais na peça, a espessura da apara após o corte, entre outros.

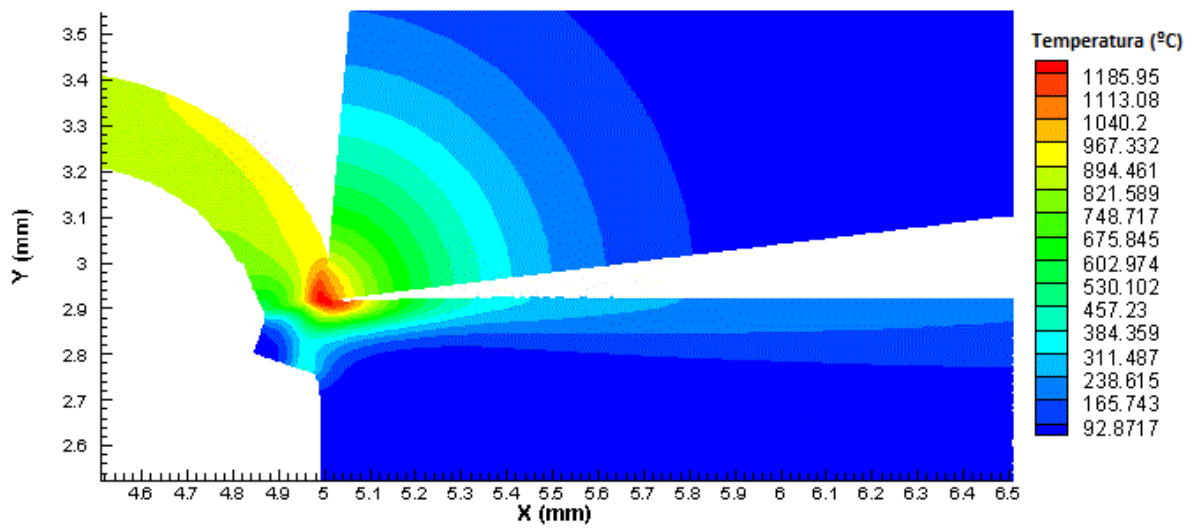


Figura 2 - Exemplo de distribuição da temperatura na avara, ferramenta e peça.

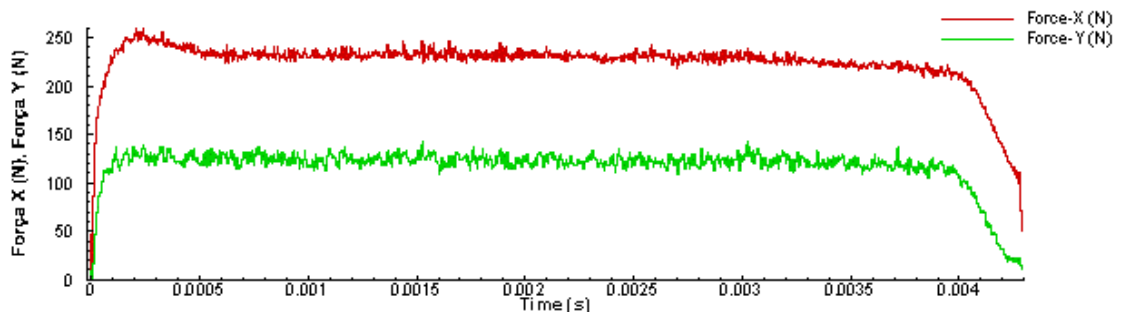


Figura 3 - Variação das forças de corte e de avanço ao longo do tempo de maquinagem.

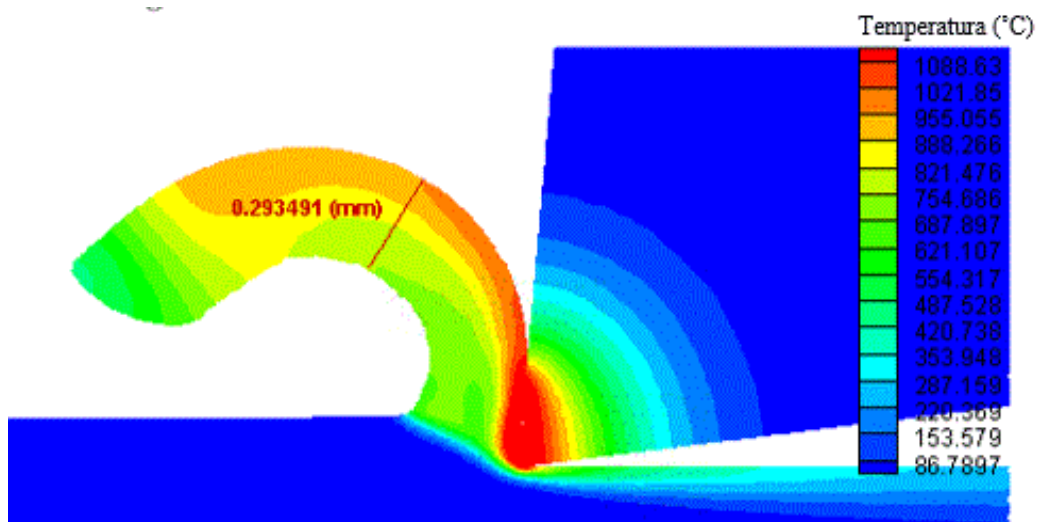


Figura 4 - Exemplo da medição da espessura da apara após o corte.

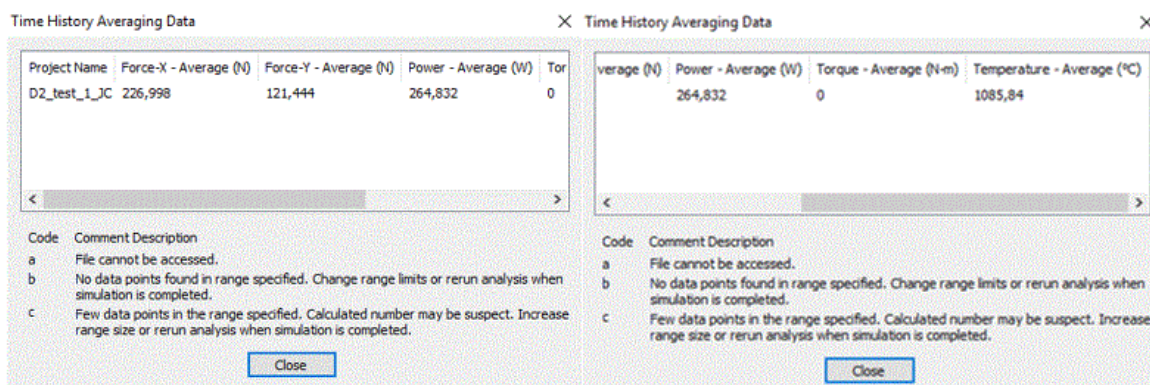


Figura 5 - Extração das forças de corte e de avanço, temperatura média e potência de maquinagem, utilizando o software Tecplot®.

A presente dissertação divide-se em cinco capítulos. No capítulo 1 é feita a introdução ao tema do trabalho, seguindo-se a pesquisa introdutória do estado de arte deste trabalho e dos objetivos propostos.

A revisão bibliográfica é feita no segundo capítulo. Este inicia-se com a descrição dos aços, onde são apresentados aspetos sobre as suas aplicações, propriedades mecânicas e físicas e tratamentos térmicos normalmente aplicados. No mesmo capítulo é descrito o corte ortogonal, são referidos os típicos parâmetros de corte, materiais e geometria das ferramentas de corte usados por vários autores. Outro assunto também presente é a maquinabilidade dos aços, sendo referidas as forças e temperaturas de corte, potência de maquinagem, grau de recalque e deformação angular.

O terceiro capítulo apresenta os aspetos gerais da simulação numérica da maquinagem por elementos finitos. São mencionados alguns dos softwares comerciais usados para a simulação numérica da maquinagem, e é também estabelecida uma comparação entre eles. Neste mesmo capítulo é apresentado o software AdvantEdge®, e feita a descrição sumária da definição dos dados de entrada, assim como a recolha dos resultados da simulação numérica.

Os resultados são apresentados no quarto capítulo, onde são mostradas as previsões obtidas na simulação numérica para as respostas termomecânicas na maquinagem dos aços. É feita a discussão e validação dos valores previstos tendo como comparação os dados experimentais recolhidos na literatura. Este capítulo é organizado em três secções, cada uma delas dedicada à recolha e análise de dados para um aço em específico, terminando com uma secção adicional onde se apresentam testes adicionais como forma de complementar alguma informação apresentada. No capítulo cinco são apresentadas as conclusões deste trabalho e são feitas também sugestões para trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica – Um estado de arte da simulação numérica do corte ortogonal de aços para moldes

2.1. Contextualização

Os aços são muito usados por diversas indústrias, onde as operações de maquinagem são recorrentemente utilizadas para fabricar componentes. O ciclo de vida desses componentes maquinados pode ser otimizado através do controlo do processo de fabrico. A abordagem experimental e numérica (simulação através do MEF) permite estudar a influência das condições de entrada na resposta na maquinagem e selecionar parâmetros de corte otimizados (Grzesik, Bartoszek and Nieslony, 2005).

A remoção de aparas por maquinagem é um processo de fabrico muito flexível através do qual é possível obter uma superfície com um bom acabamento superficial e geométrico. Várias operações de maquinagem, como a fresagem, torneamento, entre outras, são popularmente utilizadas na indústria para obter o produto desejado (Liew *et al.*, 2017). Atualmente, os principais objetivos das indústrias são aumentar a produtividade com qualidade de acabamento equilibrada com o mínimo consumo de energia, o que, por sua vez, leva ao fabrico económico e “amigo do ambiente”. Contudo, a utilização de determinados fluidos de corte, que devido à sua composição conter algumas substâncias tóxicas, pode ser um fator prejudicial aos trabalhadores e ao ambiente.

O aço AISI 1045, comercialmente conhecido como aço Ck45 (DIN), é um aço de construção base para órgãos de máquinas e peças para metalomecânica que pode ser utilizado no estado natural de fornecimento ou por tratamento térmico de têmpera ou carbonitruração, favorecendo, assim, a sua resistência ao desgaste e à oxidação (Ramada Aços, 2020).

Por sua vez, o aço AISI D2 é amplamente usado na indústria da manufatura, especialmente na produção de matrizes de grande dureza e propriedades de carga e em moldes de injeção de materiais poliméricos abrasivos. É ainda muito utilizado em ferramentais para corte, furação, estampagem, rolos para laminar roscas, matrizes de extrusão a frio, ferramentais para trefilação e dobramento, rolos para endireitamento e ferramentais para corte fino e estampagem profunda (Ramada Aços, 2020).

Já o aço AISI H13 é frequentemente usado no fabrico de matrizes e moldes de injeção, devido à sua combinação de alta dureza e resistência no trabalho a quente. Um processo tradicional de fabrico de moldes/matrizes consiste na maquinagem do aço AISI H13 convencional no estado recozido (macio), seguida de maquinagem por eletroerosão (EDM) e retificação manual de polimento/acabamento de superfície (Choudhury and Mangrulkar, 2000). É um aço com uma boa ductilidade, tenacidade, resistência ao desgaste abrasivo, temperabilidade e maquinabilidade (Ramada Aços, 2020).

Os processos de maquinagem convencional continuam a ocupar uma grande parte de todas as operações de fabrico. Novos avanços nas tecnologias de máquinas-ferramenta e ferramentas de corte, juntamente com o desenvolvimento avançado de materiais, todos voltados para a melhoria

da produtividade de fabrico, qualidade de produto e redução de custos, exigem modelos de previsão de desempenho para uso em sistemas de planeamento do processo (Arrazola *et al.*, 2013).

Os modelos de elementos finitos são amplamente utilizados para calcular as distribuições de tensão, deformação, taxa de deformação e temperatura nas zonas de corte. Conseqüentemente, as temperaturas na ferramenta, apara e peça, bem como forças de corte, deformação plástica (ângulos de corte e espessura da apara), formação de apara e eventualmente a sua quebra podem ser determinadas rapidamente (Grzesik, Bartoszek and Nieslony, 2005).

2.2. Composição química

Na Tabela 1 encontra-se a composição química dos aços que se pretende estudar no âmbito desta dissertação.

Tabela 1 - Percentagens de cada elemento na composição dos aços (Ramada Aços, 2020).

AISI	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Mo (%)	Ni (%)	Co (%)	V (%)
D2	1.45 - 1.60	0.10 - 0.60	0.20 - 0.60	0.03 max	0.03 max	11 - 13	0.70 - 1	-	1	0.70 - 1
H13	0.35 - 0.42	0.8 - 1.2	0.25 - 0.50	0.03 max	0.02 max	4.80 - 5.50	1.20 - 1.50	0.12	-	0.85 - 1.15
1045	0.42 - 0.50	0.40 max	0.50 - 0.80	0.035 max	0.035 max	-	-	-	-	-

As propriedades termomecânicas de cada aço e o seu comportamento mecânico quando sujeito a processos de transformação são afetados pela presença de determinados elementos químicos.

O níquel (Ni) tem como função aumentar a dureza do material, especialmente quando este é sujeito a tratamentos térmicos de elevada temperatura. Quanto maior for a percentagem de níquel presente no aço, maior será a sua dureza. Por outro lado, a presença de níquel no aço H13 promove o aumento da sua resistência a agentes corrosivos. Isto é especialmente relevante quando os componentes produzidos com este aço poderão estar sujeitos a contacto com outros materiais, como sucede, por exemplo, nas matrizes dos moldes de plástico (Behera, Tripathi and Chaubey, 2018).

Este elemento diminui, ainda, significativamente a oxidação do aço pelo aumento da eficiência protetora contra agentes corrosivos. Teores elevados em níquel podem, simultaneamente, reduzir os valores do coeficiente de expansão térmica para valores muito próximos do zero e a densidade de defeitos no aço (Tian *et al.*, 2020).

Relativamente ao manganês (Mn), este atua como agente dessulfurante e desoxidante e está presente nos três aços em estudo. Aumenta também a dureza e a resistência, sendo, por isso, muito utilizado em ferramentas resistentes ao desgaste. Este elemento de liga aumenta o coeficiente de expansão térmica, diminuindo a condutividade térmica e a resistividade elétrica do aço (Li *et al.*, 2016).

O cromo (Cr) aumenta a resistência à corrosão, ao calor e ao desgaste. Por outro lado, e segundo um estudo realizado por Lin *et al.* (2018), a temperatura de sinterização do aço diminui com a adição de cromo e a sua porosidade aumenta com o aumento do teor de cromo na sua composição.

O molibdênio (Mo) que atua como refinador de grão, também melhora a resistência à corrosão, abrasão e oxidação a quente. Sob condições de altas temperaturas aumenta a dureza, e tem ainda o papel de contrabalançar a tendência à fragilidade de revenido. Tem ainda a função de aumentar o limite de elasticidade, a resistência à tração e a resistência a quente. Melhora as propriedades de corte dos aços rápidos (Pinto Soares, 2019).

Por último, a adição de vanádio (V) ao material provoca um aumento da sua dureza (Han *et al.*, 1995) e o cobalto (Co) promove uma maior resistência ao impacto e à tendência do material a deformar-se (Shibuya *et al.*, 2011).

2.3. Tratamentos térmicos

Uma definição simples para tratamento térmico é apresentada por Pinto Soares (2019), que refere que o tratamento térmico é um processo no qual o aço no estado sólido é submetido a um ou vários ciclos de aquecimento, estágio e arrefecimento, de forma a conferir-lhes certas propriedades.

O ciclo de tratamento térmico varia conforme o tipo de aço e a sua aplicação. No caso dos aços para trabalho a quente, onde se insere efetivamente o aço AISI H13 em estudo, o ciclo consiste em realizar um recozimento de distensão seguido de têmpera e três revenidos (Simoneau, Ng and Elbestawi, 2007).

O recozimento de distensão efetua-se normalmente a cerca de 600 – 650 °C, conforme a qualidade do aço, durante um período relativamente longo (cerca de 1 a 2 horas de estágio) de acordo com as dimensões da peça e com o estado de tensão da mesma. Este tratamento é normalmente realizado num forno de mufla, de preferência com atmosfera neutra, caso contrário será necessário proteger a peça contra a descarbonização; também pode usar-se forno de vácuo (Pinto Soares, 2019). Este tratamento térmico serve essencialmente para eliminar ou, pelo menos, atenuar as tensões induzidas no aço, especialmente devido ao trabalho de maquinagem (Pinto Soares, 2019).

A têmpera, como os outros tratamentos térmicos, é constituída por três fases: o aquecimento, o estágio até à temperatura de têmpera (austenitização) e o arrefecimento. A temperatura de têmpera varia entre os 900 e 1150 °C para aços de trabalho a quente, conforme a composição química do aço. Esta temperatura deve ser corretamente escolhida pois tem influência particular

na estabilidade do revenido e na resistência a quente. Com efeito, a resistência ao revenido e a resistência a quente aumentam com a elevação da temperatura de têmpera (Pinto Soares, 2019).

Em relação ao aço AISI D2, o tratamento térmico aplicado a ele é o revenido, atingindo uma temperatura entre 500 °C a 550 °C (Uma Devi, Chakraborty and Mohanty, 1999). Fathallah, Braham and Sidhom (2020) verificaram que, de facto, a microestrutura resultante deste tratamento térmico a uma temperatura de 550 °C apresenta uma estrutura martensítica com uma dispersão de placas de carboneto de crómio M_7C_2 e pequenas partículas redondas de carboneto de crómio $M_{23}C_6$, o que confere um aumento significativo da dureza e de resistência ao material. No entanto, Salunkhe *et al.* (2015) referem que, contrariamente a esta metodologia de tratamentos térmicos e quando o aço apresenta estrutura martensítica com elevado teor de crómio, pode-se realizar:

- Austenitização entre 950 °C e 1100 °C, seguida de arrefecimento;
- Revenido entre 200 °C e 300 °C para lhe conferir alta resistência e tenacidade moderada e resistência.

e/ou

- Revenido entre 600 °C e 700 °C para uma resistência moderada e alta tenacidade.

Por fim, o aço AISI 1045 é normalmente submetido a uma sequência de tratamentos térmicos. É inicialmente aquecido a uma temperatura de 850 °C durante 8 minutos e arrefecido logo de seguida por choque térmico em água. De seguida, é submetido a revenido durante 30 minutos a uma temperatura de 580 °C e, por fim, deixado arrefecer naturalmente à temperatura ambiente (Lu *et al.*, 2017).

Este aço pode também ser fornecido no seu estado natural (Ramada Aços, 2020).

2.4. Maquinabilidade dos aços

Maquinabilidade é uma característica que indica a dificuldade envolvida na maquinagem de um material e é um fator com enorme influência sobre a produtividade, encontrando-se relacionado com a resistência oferecida ao corte em ensaios de maquinagem. Um material com boa maquinabilidade geralmente é fácil de cortar ou trabalhar, não causando desgaste excessivo das ferramentas que nele são usadas e as operações de acabamento não requerem esforço excessivo por parte da máquina e/ou ferramenta (Rajeshshyam, Krishnaraj and Thillairajan, 2020).

O processo de avaliação da maquinabilidade de um determinado material pode ser bastante complexo. Vários fatores podem ter influência direta neste parâmetro, como as qualidades físicas e químicas do material, as condições e as propriedades da máquina de corte (Saravanamurugan *et al.*, 2020).

Para se perceber como certos materiais são difíceis de maquinar, a classificação da sua maquinabilidade efetua-se em comparação com a dificuldade de maquinar um tipo específico de

aço, ou seja, atribui-se um valor de 100% para um determinado tipo de aço, tornando-o um padrão para outras avaliações (Gomes, 2013). O aço padrão é o aço AISI B-1112 (aço de corte fácil). Num sistema como este, os materiais com uma classificação inferior a 100% são difíceis de trabalhar. A este valor dá-se o nome de índice de maquinabilidade do material.

$$\text{Índice} = \frac{V_{C60(\text{material})}}{V_{C60(\text{AISI B-1112})}} \times 100 \quad \text{Eq. (1)}$$

- $V_{C60(\text{material})}$ - Velocidade de corte para 60 minutos de maquinagem do material [m/min];
- $V_{C60(\text{AISI B-1112})}$ - Velocidade de corte para 60 minutos de maquinagem do material padrão [m/min];

Tabela 2 - Índices de maquinabilidade de alguns materiais metálicos (Gomes, 2013).

Materiais Metálicos	Maquinabilidade (%)
AISI B-1112 (aço de corte fácil)	100
AISI B-1113 (aço de corte fácil)	135
AISI C-1045 (aço de construção ao carbono)	60
AISI A-5120 (aço para moldes)	65
AISI A-5150 (aço para ferramentas)	65
Aço inoxidável 18-8 (austenítico)	25
Ferro fundido maleável (ferrítico)	100 - 120
Ferro fundido maleável (perlítico)	70

Na realidade, a maquinabilidade é a manifestação da interação entre a peça do material a maquinar e a ferramenta submetida pelo poder da máquina e pode ser avaliada convencionalmente em função dos seguintes critérios:

- Acabamento de superfície da peça;
- Desgaste da ferramenta;
- Formação de avara;
- Força e potência específica de corte.

Uma boa maquinabilidade traduz-se num bom acabamento de superfície, em baixa força e potência de corte e também baixo desgaste da ferramenta (Gomes, 2013).

2.5. Corte por arranque de avara – Simulação e corte ortogonal

O corte de metal por arranque de avara é um dos processos de fabrico bastante utilizados industrialmente, onde através de operações como o torneamento, a fresagem e a furação é possível obter componentes com geometrias complexas e bom acabamento superficial. Ainda assim, a maquinagem é um processo termomecânico complexo que envolve uma variedade de fenómenos físicos, como alta deformação plástica do material da peça, condições de atrito severas na interface avara-ferramenta e mecanismo de fratura responsáveis pela formação de avara. Através do controlo dos parâmetros envolvidos, no processo de maquinagem é possível atingir os requisitos de qualidade definidos para os componentes maquinados. Tradicionalmente este tipo de análise é realizado através de ensaios de maquinagem, contudo através de simulação numérica por elementos finitos é possível aferir a influência dos parâmetros de corte na resposta obtida durante a maquinagem (Bil, Kiliç and Tekkaya, 2004).

Especificamente, o corte ortogonal é um processo de corte onde a aresta de corte é perpendicular à direção de corte. Além disso, a avara flui apenas para a direção perpendicular à aresta de corte, e não para os dois lados (Figura 6). No entanto, é muito difícil satisfazer estritamente as previsões de corte ortogonal no processo de maquinagem experimental. O material na zona de contacto é exposto a alta pressão e temperatura que flui ao longo da direção transversal (Liu *et al.*, 2017).

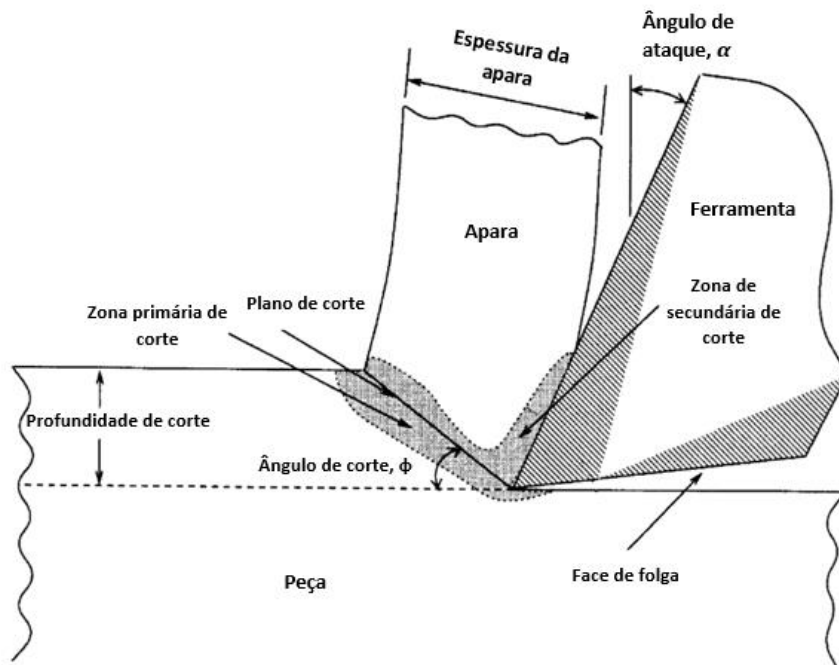


Figura 6 – Representação do corte ortogonal (Zinov'ev and Sole, 2004).

Abordagens experimentais para estudar o processo de maquinagem são importantes, no entanto, podem ser complementadas pela análise através de software de análise de elementos finitos, especialmente quando uma ampla gama de parâmetros está envolvida, como condições de maquinagem, material da peça e tipos de ferramentas envolvidos. Estes parâmetros influenciam diretamente as forças de corte, a morfologia da peça, a vida útil da ferramenta e a qualidade do produto final.

O software *AdvantEdge* é uma ferramenta computacional bastante completa para simulação de todos os métodos de corte por arranque de peça em ligas metálicas e permite avaliar a resposta obtida durante a maquinagem, em função dos parâmetros de corte definidos pelo utilizador. É um software que permite a realização de simulações em 2D e 3D. Contudo, nesta dissertação optou por se realizar apenas simulações em corte 2D, por requerer um menor esforço computacional e permitir executar simulações com maior rapidez e existir uma maior facilidade na comparação com modelos analíticos, como o modelo de Merchant e setups experimentais conduzidos em condições de ortogonalidade. No capítulo 3 está explicado mais detalhadamente o funcionamento da simulação neste software.

No desenvolvimento de simulações numéricas e processos de maquinagem são diversos os aspetos que podem contribuir para a obtenção de modelos confiáveis. Podem destacar-se aspetos como os modelos que descrevem o comportamento viscoelástico do material da peça e as condições de atrito na interface peça-apara. As condições de atrito geradas durante a maquinagem têm influência direta nas forças de corte, na distribuição de tensões residuais na superfície e na temperatura de corte (Ward *et al.*, 2005).

Apesar de existirem diversos modelos que descrevem as condições de atrito na interface ferramenta-apara, o modelo de Coulomb é bastante utilizado para calcular o coeficiente de atrito entre a peça e a ferramenta. A equação de Coulomb pode ser expressa da seguinte forma:

$$\mu = \frac{F_f + F_c \cdot \tan\gamma}{F_c + F_f \cdot \tan\gamma} \quad \text{Eq. (2)}$$

onde F_f representa a força de avanço [N], F_c a força de corte [N] e γ o ângulo de ataque [°].

A precisão do modelo desenvolvido depende das condições de fricção, devido à sua influência direta nas forças de corte e distribuição de tensões e temperaturas na superfície da peça. As condições de interface entre a peça e a ferramenta são difíceis de avaliar experimentalmente devido às elevadas tensões e temperaturas que ocorrem nessa região (Priyadarshini, Pal and Samantaray, 2015).

Durante os últimos anos, os processos de corte evoluíram, lado a lado com o desenvolvimento das máquinas ferramentas, para processos que envolvem uma imensa variedade de configurações. O desenvolvimento das ferramentas também tem contribuído com as novas possibilidades, juntamente com ganhos de produtividade, fiabilidade e a constante qualidade que se tem conseguido com a tecnologia de pastilhas intercambiáveis em metal duro (Sandvik Coromant, 2020).

2.6. Parâmetros de corte

A maquinagem é um processo multivariável e envolve uma interação complexa entre os parâmetros de entrada e a resposta obtida. Tipicamente, nas operações de maquinagem consideram-se as variáveis de entrada, os parâmetros de corte (velocidade de corte, profundidade de corte, entre outros), as ferramentas de corte (geometria, composição, presença de revestimentos) e o material da peça a maquinar (composição química, microestrutura e propriedades termomecânicas) (Sarma and Rajbongshi, 2020). No que diz respeito às variáveis de resposta, estas podem ser obtidas durante o processo de corte, destacam-se por exemplo, as forças de corte, as vibrações e a temperatura de corte. Estas variáveis podem ser medidas experimentalmente, através de sensores como os dinamómetros, acelerómetros e termopares (ou câmaras térmicas), ou obtidas através de simulação numérica por elementos finitos. Outras variáveis de resposta, podem ser quantificadas depois do processo de corte, não só através da análise das ferramentas de corte para avaliação do desgaste e dos mecanismos de desgaste, mas também pela análise das aparas formadas e das superfícies maquinadas (Huang *et al.*, 2018). A topografia das superfícies maquinadas pode ser avaliada através de equipamentos como os rugosímetros e a subcamada através de microscopia digital ou por difração por Raio-X para obtenção da tensão residual provocada pela maquinagem. Importa referir que a tensão residual é um parâmetro que também pode ser obtido numericamente em muitos softwares de simulação de operações de maquinagem. Como se pode verificar pela Tabela 3, diversos autores têm proposto metodologias de aquisição e tratamento dessas variáveis que caracterizam as operações de maquinagem e desenvolvido estratégias de modelação e otimização desses processos de forma a entender a influência dos parâmetros de entrada na resposta obtida (Fallböhmer *et al.*, 2000).

Os procedimentos experimentais estão também diretamente relacionados com o gasto de tempo e dinheiro e aí reside uma das grandes vantagens de usar simulação numérica - é possível determinar o comportamento termomecânico da ferramenta e da peça. Contudo, a precisão dos resultados obtidos com simulação numérica depende muito da precisão dos dados introduzidos no software (Krolczyk *et al.*, 2019).

Otimizando os parâmetros de corte utilizados na maquinagem das peças é possível aumentar significativamente a eficiência dos processos de remoção de material e, ao mesmo tempo, o custo de fabrico mantendo a qualidade final das peças obtidas.

Yan, Hua and Shivpuri (2005) verificaram que a utilização de velocidades de corte elevadas combinadas com profundidades de corte reduzidas e raios de ponta de ferramenta o maior possível resultam numa diminuição das tensões normais na superfície maquinada.

Na Tabela 3 estão especificados alguns parâmetros de corte selecionados por diversos autores na maquinagem de aços.

Tabela 3 - Condições de corte testadas em estudos anteriores.

Autor	Aço/ Operação	Ferramenta	Vc (m/min)	a (mm/rot)	p (mm)	Resposta medida	MQL
Mallick <i>et al.</i> , 2020	AISI D2 - Torneamento	- Carboneto de tungstênio com revestimento CVD - PCBN	175	0.01	0.2	Temperaturas de corte	Sim
Mallick <i>et al.</i> , 2020	AISI D2 - Torneamento	CBN	120	0.16	0.35	Tensão residual na superfície	Sim
Sarma and Rajbongshi, 2020	AISI 1045 - Torneamento	Pastilhas com e sem revestimento de carboneto	100 150 100 150	0.05 0.05 0.15 0.15	0.25 0.55 0.25 0.55	Força de corte e força de avanço	Não
Ayabaca, Vila and Abellan-Nebot, 2019	AISI 1045 - Acabamento por fresagem	MITSUBISHI VPX300R 4004SA32SA com pastilhas LOGU1207080PNER-M (MP6120)	50 80 100 150	0.10 0.5	0.5 1.5 5	Acabamento da superfície	Não
Liu <i>et al.</i> , 2019	AISI H13 - Torneamento	TNMF160408 com e sem revestimento de carboneto	300 300	0.4 0.6	0.07 0.09	Desgaste da ferramenta e acabamento da superfície	Não
Liu <i>et al.</i> , 2019	AISI H13 - Torneamento	TNMF160408 com e sem revestimento de carboneto	300 500 700	0.05 0.05 0.05	0.2 0.2 0.2	Desgaste da ferramenta e acabamento da superfície	Não
Arruda <i>et al.</i> , 2019	AISI H13 - Acabamento por fresagem	CoroMill™ R216.42-06030-AK10G com revestimento PVD TiAlN	160	0.088	0.18	Acabamento da superfície	Não

A Tabela 3 mostra uma grande variedade de estudos realizados no âmbito do corte por arranque de apara. Pode verificar-se que existe uma grande incidência no estudo de velocidades de corte num intervalo entre 100 e 200 m/min, avanços entre 0.01 e 0.16 mm/rot e profundidades de corte entre 0.2 e 1.5 mm, sendo 1.5 mm um valor bastante acima de todos os outros. É também visível que um dos grandes focos de estudo é o acabamento superficial, no entanto, as forças e temperaturas de corte assumem também uma elevada importância, estando diretamente relacionadas com a qualidade do acabamento da superfície.

Sarma and Rajbongshi (2020), Tabela 3, verificaram que a razão que explica a reduzida força de corte nas ferramentas texturizadas deve-se ao reduzido comprimento de contacto e à pequena área de contacto da interface apara-ferramenta. As ferramentas texturizadas produzem forças de corte e de avanço relativamente reduzidas comparativamente às ferramentas não texturizadas. O coeficiente de atrito obtido é inferior para as ferramentas com pontos de texturização, em comparação com as totalmente texturizadas e não texturizadas.

2.7. Ferramentas de corte

As ferramentas de corte utilizadas nas operações de maquinagem devem possuir características que favoreçam o processo de maquinagem, entre elas a dureza a quente, resistência ao desgaste, estabilidade térmica e química. Para prolongar a vida útil das ferramentas de corte, são utilizados revestimentos simples e de multicamadas, o que enriquece as propriedades da superfície (reduzindo o desgaste e conduzindo melhor o calor na zona de corte) e a sua maquinabilidade. É uma das melhores soluções que integram as vantagens das ferramentas convencionais. Nos últimos anos, vários métodos de deposição e revestimento foram desenvolvidos com sucesso para redução de atrito e proteção da superfície nos sistemas mecânicos; é importante que todas as ferramentas de corte exibam alta estabilidade térmica (Zetek, Česáková and Švarc, 2014).

Foi verificado na literatura que as ferramentas mais utilizadas na indústria de produção de moldes são as de carbonetos sinterizados. Estas ferramentas possuem propriedades que conferem maior tempo de vida à ferramenta, velocidades de corte bastante superiores, melhor acabamento superficial e maior taxa de remoção de material (He *et al.*, 2020).

Posto isto, apareceram no mercado técnicas de revestimento (deposição química em fase de vapor – CVD, seguida da deposição física em fase de vapor – PVD).

De acordo com Moganapriya *et al.* (2020), para os mesmos parâmetros de corte, as ferramentas revestidas com PVD apresentam menor desgaste do que as ferramentas revestidas com CVD.

Os revestimentos CVD têm funções ligeiramente diferentes de quando aplicados com auxílio de PVD. No caso do revestimento de CVD, a camada de alumina (Al_2O_3) é quimicamente inerte e tem baixa condutividade térmica tornando a pastilha resistente ao desgaste em cratera. Atua ainda como barreira térmica para melhorar a resistência à deformação plástica. Por sua vez, a camada de carbonitreto de titânio (TiCN) oferece maior resistência ao desgaste abrasivo resultando também

na redução do desgaste do flanco. Por fim, o nitreto de titânio (TiN) aumenta a resistência ao desgaste, sendo sempre a camada mais superficial o que a torna na camada detetora do próprio desgaste. O substrato é otimizado de modo a obter uma máxima resistência à deformação sem perder robustez (Sandvik Coromant, 2020).

No caso do PVD, a primeira cobertura PVD é de nitreto de titânio, TiN, que possui propriedades de uso geral e uma cor dourada. A camada de carbonitreto de titânio (TiCN) é mais dura que a camada de TiN, oferecendo maior resistência ao desgaste do flanco. De seguida, a camada de nitreto de titânio-alumínio possui maior dureza em combinação com resistência à oxidação, melhorando a resistência ao desgaste. Por fim, o óxido PVD é usado como uma camada com propriedades químicas inertes e resistente à craterização (Sandvik Coromant, 2020).

De acordo com a Sandvik Coromant (2020) e a Korloy (2020), as ferramentas sugeridas inserem-se maioritariamente na classe P, sendo que cada conjunto de pastilhas especifica a velocidade de corte recomendada, bem como o avanço da ferramenta, com base na sua composição química, características mecânicas, revestimentos, etc.

Algumas podem ainda inserir-se na classe M (classe de aços inoxidáveis). Contudo, para o presente estudo, será mais relevante estudar os parâmetros envolvidos com ferramentas que suportem velocidades de corte e avanços elevados, reduzindo o tempo de maquinagem não comprometendo a qualidade nem a segurança dos operadores.

No entanto, as ferramentas compostas por carbonetos sinterizados (metais duros), desenvolvidas para possibilitar a maquinagem com velocidades de corte mais elevadas e viabilizar taxas de produção mais elevadas, podem apresentar problemas. Uma má escolha do material pode levar à deterioração da ferramenta e/ou da peça a fabricar.

Geralmente, na maquinagem destes aços com ferramentas de carbonetos, ocorre abrasão, adesão e oxidação (Moganapriya *et al.*, 2020). Alguns trabalhos de investigação têm relacionado tais ocorrências à velocidade de corte.

O software de simulação *Advantedge* possui uma vasta gama de ferramentas de corte e revestimentos, sendo ainda possível criar a própria ferramenta caso as suas especificações não estejam explícitas na sua biblioteca. Para tal, é necessário conhecer os parâmetros e ferramentas que têm vindo a ser utilizados por outros autores no estudo das temperaturas e forças de corte no processo de corte ortogonal.

Zetek, Česáková and Švarc (2014) estudaram a influência do desgaste da ferramenta nas forças de maquinagem. Utilizando pastilhas com diversos raios de ponta, os autores observaram que a força de penetramento (F_p) é maior nas pastilhas em fim de vida quando comparadas com pastilhas novas. Ou seja, as forças de corte podem ser utilizadas para avaliar o desgaste da ferramenta, pois com o desgaste, a geometria da ferramenta e a forma da apra mudam. Por este motivo, é importante estudar as forças de corte.

2.8. Fluidos de corte

A maquinagem de aço com elevadas velocidades de corte e rotações produz naturalmente uma elevada temperatura da zona de corte devido ao atrito causado pelas aparas metálicas que escoam através da aresta de corte. Essas altas temperaturas causam desvio dimensional e deterioração prematura das ferramentas de corte (Kitamura *et al.*, 2020). Os fluidos de corte têm, por isso, grande influência no desempenho das operações devido à sua lubrificação, arrefecimento e escoamento de resíduos.

Atualmente, existem vários aspetos condicionantes na utilização de fluidos de corte lubrificantes. O consumo de energia, a poluição e os resíduos industriais têm despertado especial atenção e o meio ambiente tornou-se um dos assuntos mais importantes dentro do contexto atual (Awale *et al.*, 2020) e têm sido elaboradas leis cada vez mais rigorosas no sentido de proteger o meio ambiente e preservar os recursos energéticos. Todos estes fatores têm incentivado as indústrias, centros de pesquisas e universidades a investigarem processos de produção alternativos, criando tecnologias que minimizem ou evitem a produção de resíduos que agridam o meio ambiente.

Métodos como MQL e MQCL ajudam especialmente nestes aspetos. *Minimum quantity lubrication* (MQL) e *Minimum quantity cooling lubrication* (MQCL) indicam a utilização de uma pequena quantidade de um agente de arrefecimento/lubrificação sob a forma de aerossol na zona de corte. Esta tecnologia é uma prática alternativa à maquinagem a seco e à maquinagem com lubrificação abundante, que tem em consideração os fatores ecológicos e económicos, e tem como principais benefícios o baixo custo de lubrificação, poupança de energia e melhor aproveitamento do fluido de corte, promovendo o consumo energético eficiente (Krolczyk *et al.*, 2019).

Na fresagem, as temperaturas geradas na aresta de corte podem chegar aos 1000 °C (Sandvik Coromant, 2020), o que pode fazer com que as propriedades mecânicas do material se alterem na zona incidente do calor. De modo a contrariar este facto, é importante que não ocorram oscilações de temperatura muito bruscas no material, e isto pode ser conseguido recorrendo à refrigeração na zona de corte. Por outro lado, os materiais usados nas ferramentas para maquinar a alta velocidade estão também sujeitos a estas temperaturas, devendo conservar as suas propriedades mecânicas para as condições de corte seleccionadas. Estas ferramentas são utilizadas para maquinar a seco e a utilização de fluidos de corte pode, também, originar choques térmicos e provocar a fissuração do material da ferramenta.

Revuru *et al.* (2018) estudaram, com recurso a análise por elementos finitos, a performance de alguns fluidos de corte por lubrificação MQL na maquinagem do aço AISI 1040, e avaliaram a sua influência nas forças geradas durante o corte. Os detalhes e parâmetros de corte utilizados na análise estão presentes na Tabela 4.

Tabela 4 - Detalhes experimentais (Revuru *et al.*, 2018).

Ferramenta de corte	CCMT09Y304 (Pastilhas de carboneto de tungstênio revestidas com PVD)
Ambiente de lubrificação	MQL, nano/micro fluidos, a seco
Velocidade de corte (m/min)	110
Avanço (mm/rot)	0.14
Profundidade de corte (mm)	0.2
Nano/micropartículas	Ácido bórico (AB), dissulfeto de molibdênio (MoS ₂)
Concentração de lubrificante sólido	0.25%, 0.5%, 0.75% & 1% (w/w)
Caudal de lubrificante (mL/min)	10
Respostas medidas	Forças e temperaturas de corte e rugosidade da superfície

Foi verificado que, entre os casos de lubrificação considerados, o desempenho de nMoS₂ (nanodissulfeto de molibdênio) foi melhor. Verificou-se que as forças de corte foram reduzidas em cerca de 82%, quando comparadas à maquinagem a seco. As forças de corte reduziram mais de 40% com o nanofluido comparado ao microfluido. O teor de 0,5% de nMoS₂ reduziu as forças de corte entre as percentagens seleccionadas de nano partículas.

Os resultados da evolução das forças de corte no tempo para os diferentes tipos de lubrificação estão presentes na Figura 7.

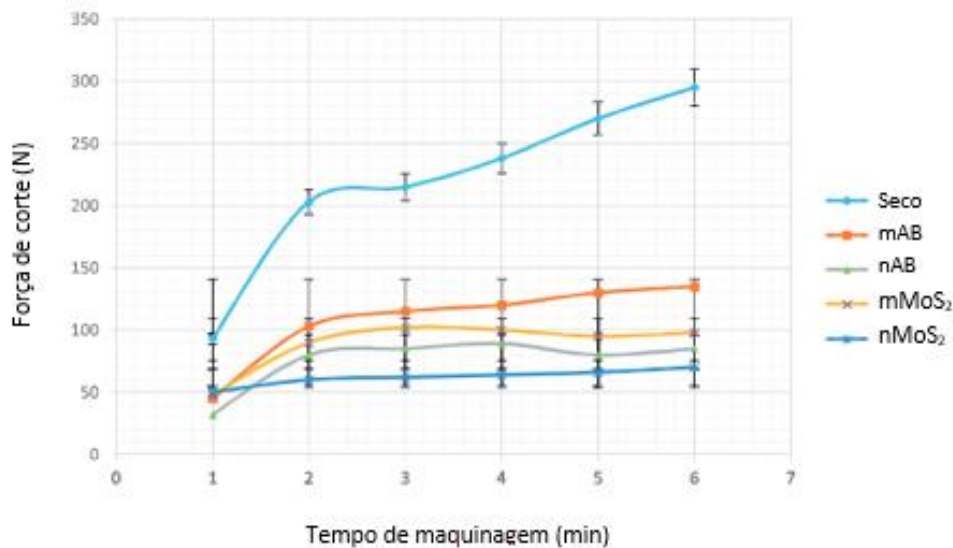


Figura 7 - Evolução das forças de corte ao longo do tempo para os diferentes tipos de lubrificação (Revuru *et al.*, 2018).

Özbek and Saruhan (2020) averiguaram a influência do fluido de corte nas temperaturas geradas durante o processo de corte no estudo do acabamento de superfície do aço AISI D2 para as velocidades de corte de 60, 90 e 120 m/min com ferramentas CVD e PCD. O aumento da velocidade de corte promoveu um aumento do atrito na interface peça-apara, bem como um aumento da temperatura na zona de corte. Comparado à maquinagem a seco, o sistema MQL reduz a temperatura da zona de corte em aproximadamente 100 ° C para todas as velocidades de corte referidas, resultado da redução do atrito na superfície maquinada.

A Figura 8 ilustra a influência da velocidade de corte nas temperaturas geradas no processo com e sem fluido de corte.

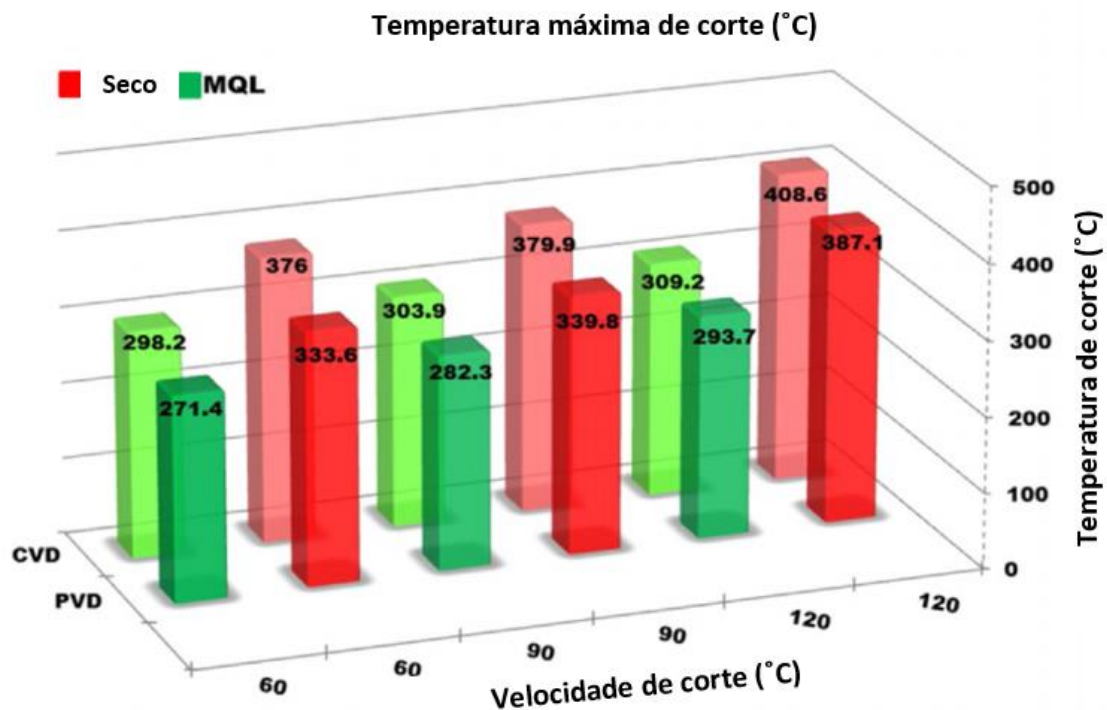


Figura 8 - Temperatura de corte em função da velocidade de corte para maquinagem a seco e MQL (Özbek and Saruhan, 2020).

2.9. Forças, temperaturas e potência de corte

A força de corte é designada como a força que atua sobre a ferramenta durante o processo de corte e, na maquinagem de aços, estas forças estão relacionadas a dureza e resistência mecânica do material. Através da análise das forças de corte é possível aferir aspetos relacionados com o desgaste e falha da aresta de corte e assim garantir que o acabamento superficial da peça não é afetado (Zhang, Zhang and Li, 2017). Deste modo, recorrendo a softwares de simulação FEM, é possível prever o comportamento tanto do material como da ferramenta quando submetidos a determinadas forças de corte.

Mebrahitom, Choon and Azhari (2017) simularam em 2D, com recurso a um modelo de elementos finitos, operações de fresagem lateral do aço AISI H13, os autores avaliaram as forças de corte na direção tangencial e radial. Foi verificado que, mantendo constantes o avanço da ferramenta e a profundidade de corte, quando a velocidade de corte foi aumentada, as forças tangenciais e radiais diminuíram.

A Figura 9 compara os valores das forças de corte e de avanço obtidos experimentalmente com os valores simulados.

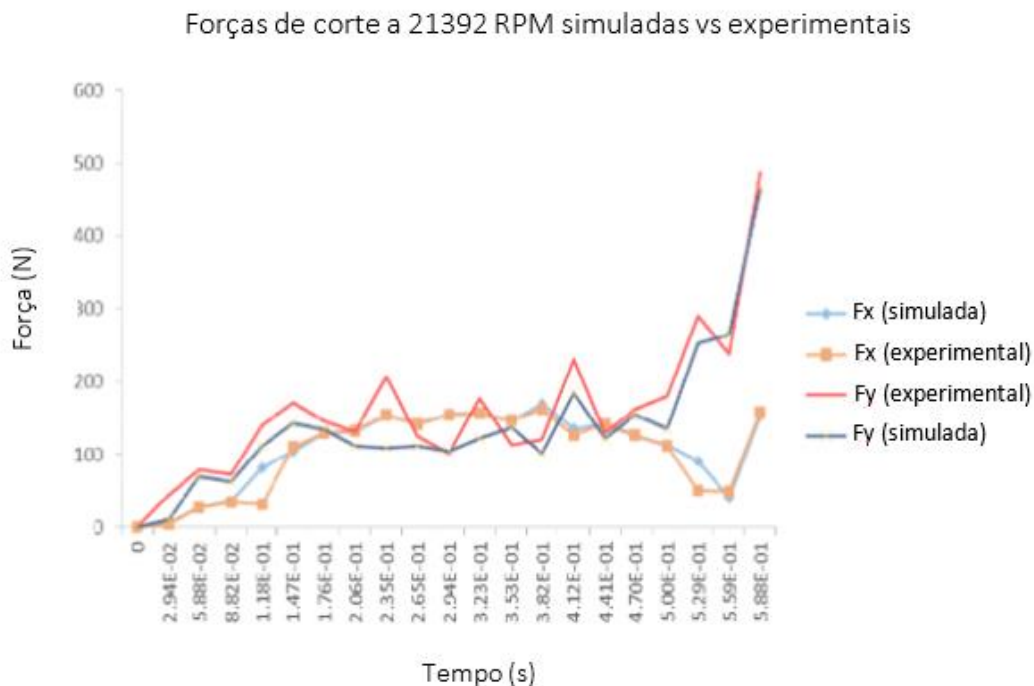


Figura 9 - Comparação de valores experimentais e simulados (Mebrabitom, Choon and Azhari, 2017).

Zhang, Zhang and Li (2017) verificaram a influência dos parâmetros de corte nas forças de corte numa operação de fresagem do aço AISI H13. O efeito da velocidade de corte nas forças de corte é mostrado na Figura 10 (a). Pode ser visto na figura que as três componentes das forças variam

pouco com o aumento da velocidade de corte. O efeito do avanço da ferramenta nas forças de corte é mostrado na Figura 10 (b). Conforme mostrado na figura, as forças de corte aumentam rapidamente quando o avanço sobe de 0,25 mm/dente para 0,35 mm/dente. E quando o avanço sobe de 0,35 mm/dente para 0,45 mm/dente, as forças de corte aumentam gradualmente. A influência do avanço em F_z é a mais significativa, porque com o aumento do avanço a espessura de corte da peça aumenta, o que dá origem a uma força de corte maior.

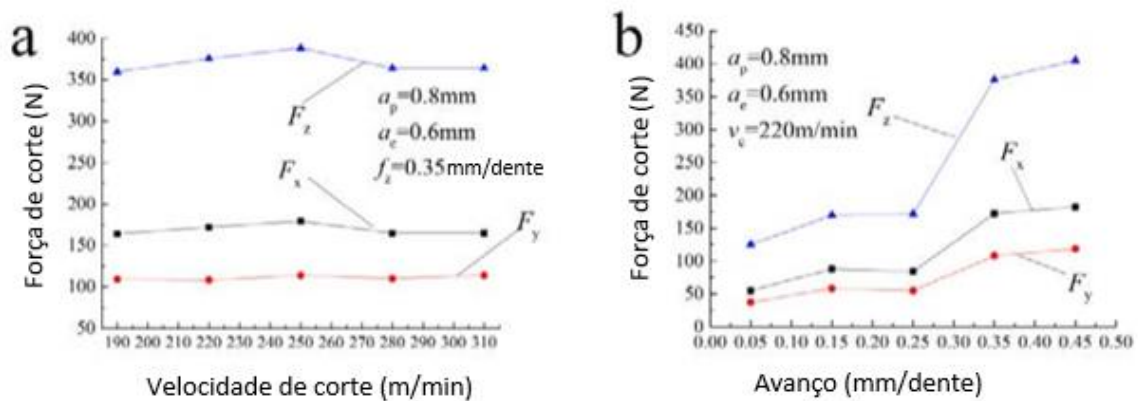


Figura 10 - Força de corte experimental em função a) da velocidade de corte e b) do avanço por dente da ferramenta (Zhang, Zhang and Li, 2017).

Medina-Clavijo *et al.* (2018) realizaram ensaios de corte ortogonal em barras de aço AISI 1045 com 58 mm de diâmetro e mediram as temperaturas atingidas durante o corte com recurso a termopares localizados na ferramenta de corte. Verificaram que quando se transita de uma velocidade de corte de 25 m/min para 50 m/min, ocorre um aumento abrupto das forças de corte, espessura e microestrutura da avara.

Grzesik, Bartoszek and Nieslony (2005) desenvolveram um modelo de elementos finitos em *Advantage* para a distribuição da temperatura na zona de corte no torneamento do aço AISI 1045, com pastilhas de metal duro revestidas. Na Tabela 5 é possível ver os parâmetros de corte utilizados na simulação. Na Figura 11 é apresentado um contorno onde é possível observar o gradiente de temperatura na avara, peça e ferramenta de corte.

Tabela 5 - Detalhes de corte (Grzesik, Bartoszek and Nieslony, 2005).

Material da ferramenta de corte	ISO P20 com revestimento de carboneto
Ângulo da face de ataque (rake angle) (°)	-5
Ângulo de saída ou de folga (reliefe angle) (°)	5
Raio de ponta (μm)	17 – 33
Espessura da apara (mm)	0.16
Profundidade de corte (mm)	2.0
Velocidade de corte (m/min)	103.2
Coefficiente de fricção	0.5
Avanço (mm/rot)	0.16

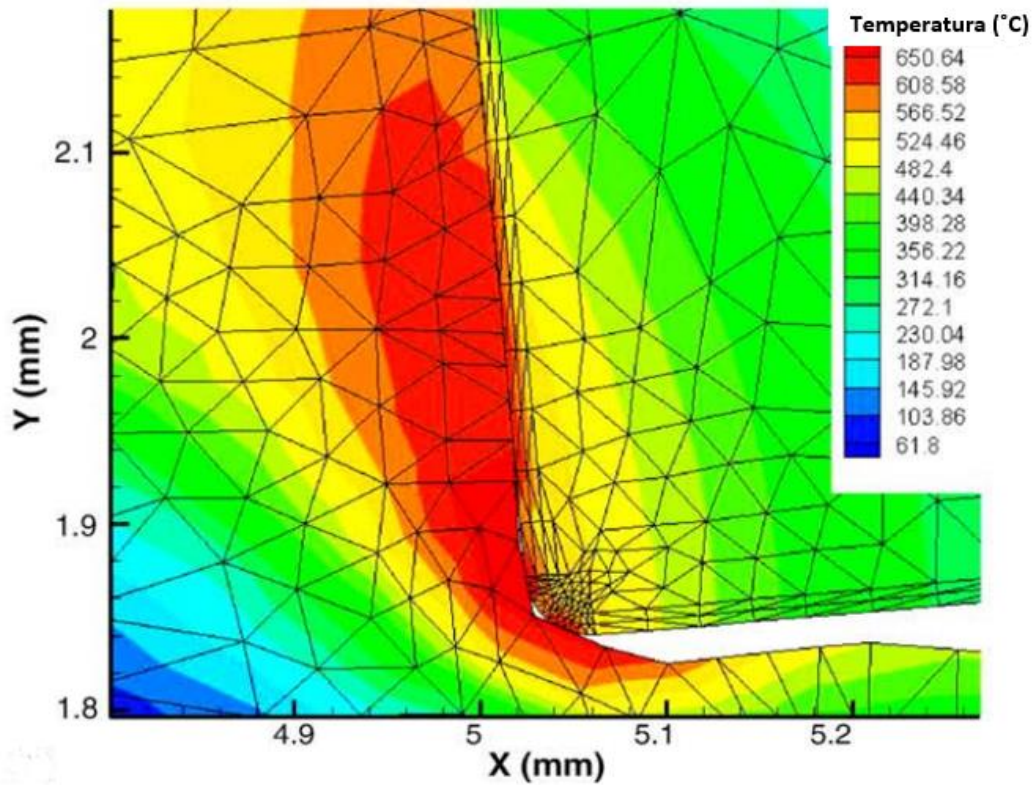


Figura 11 - Distribuição da temperatura no corte ortogonal do aço AISI 1045 (Grzesik, Bartoszek and Nieslony, 2005).

A maquinagem a alta velocidade gera sempre elevadas temperaturas, o que promove o processo de difusão e oxidação da ferramenta. O processo de difusão entre a apra e a superfície da ferramenta de corte resulta em desgaste, e as reações de oxidação com o ambiente deterioram a aresta de corte e o material da peça (Ghani, Choudhury and Masjuki, 2004).

Huang *et al.* (2018) fizeram testes de acabamento de superfície por fresagem do aço AISI D2, com diferentes velocidades de corte. A tensão residual induzida na direção de avanço ocorre em estado compressivo. O aumento da velocidade de corte levou não apenas à diminuição da tensão residual de compressão, mas também ao aumento da tensão residual nas direções de avanço. A alta tensão residual de compressão, juntamente com um grau adequado de endurecimento superficial, contribui para a melhoria da resistência à fadiga.

Por último, a potência de corte também é uma variável bastante significativa no estudo da eficiência do processo de corte, e pode ser obtida recorrendo à simulação numérica. O aço é um material de difícil maquinabilidade, fazendo com que a potência de corte tome valores elevados, o que se traduz em elevados custos de maquinagem (Wegener *et al.*, 2016).

Analicamente, é possível calcular esta potência recorrendo à seguinte equação:

$$P_C = \frac{ap \cdot V_c \cdot f \cdot k_c}{60 \cdot 10^3 \cdot \eta} \quad \text{Eq. (3)}$$

- ap - Profundidade de corte [mm];
- f – Avanço da ferramenta [mm/rot];
- V_c – Velocidade de corte [m/min];
- K_c - Força específica de corte (dependente do material);
- η – Eficiência da máquina-ferramenta.

Bagaber e Yusoff (2017) realizaram um estudo multiobjetivo incidente na otimização dos parâmetros de corte com vista a minimizar a potência consumida durante o processo de torneamento a seco do aço inoxidável 316. Foi utilizada uma ferramenta não revestida de carboneto para maquinagem específica para aço inoxidável. Com este estudo foi possível concluir que o valor mínimo de consumo de energia do processo de corte foi obtido para o menor valor de velocidade de corte e nos maiores valores de taxa de avanço e profundidade de corte, que contribuíram com 37,43% e 20,5%, respectivamente. Esta percentagem foi calculada com base numa análise de variância (ANOVA), da seguinte forma:

$$PC\% = \frac{SS_d}{SS_T} \times 100 \quad \text{Eq. (4)}$$

onde SS_d representa a soma dos desvios quadrados e SS_T a soma total dos desvios quadrados.

Foi ainda verificado que o fator com a influência mais significativa na rugosidade superficial foi a taxa de avanço, que teve uma contribuição de 53,8%, seguida da velocidade de corte com uma contribuição de 11%. A rugosidade da superfície foi minimizada quando a taxa de avanço e a profundidade de corte estavam nos seus níveis mais baixos. Entre os principais parâmetros de entrada, a velocidade de corte foi o fator mais significativo no desgaste da ferramenta com uma contribuição de 39%, seguida pela profundidade de corte a 14,3%, mas não foi influenciada pela taxa de avanço.

Na Figura 12 está ilustrada a influência dos diferentes parâmetros de corte nos valores da potência de corte, obtidos por Bagaber e Yusoff (2017).

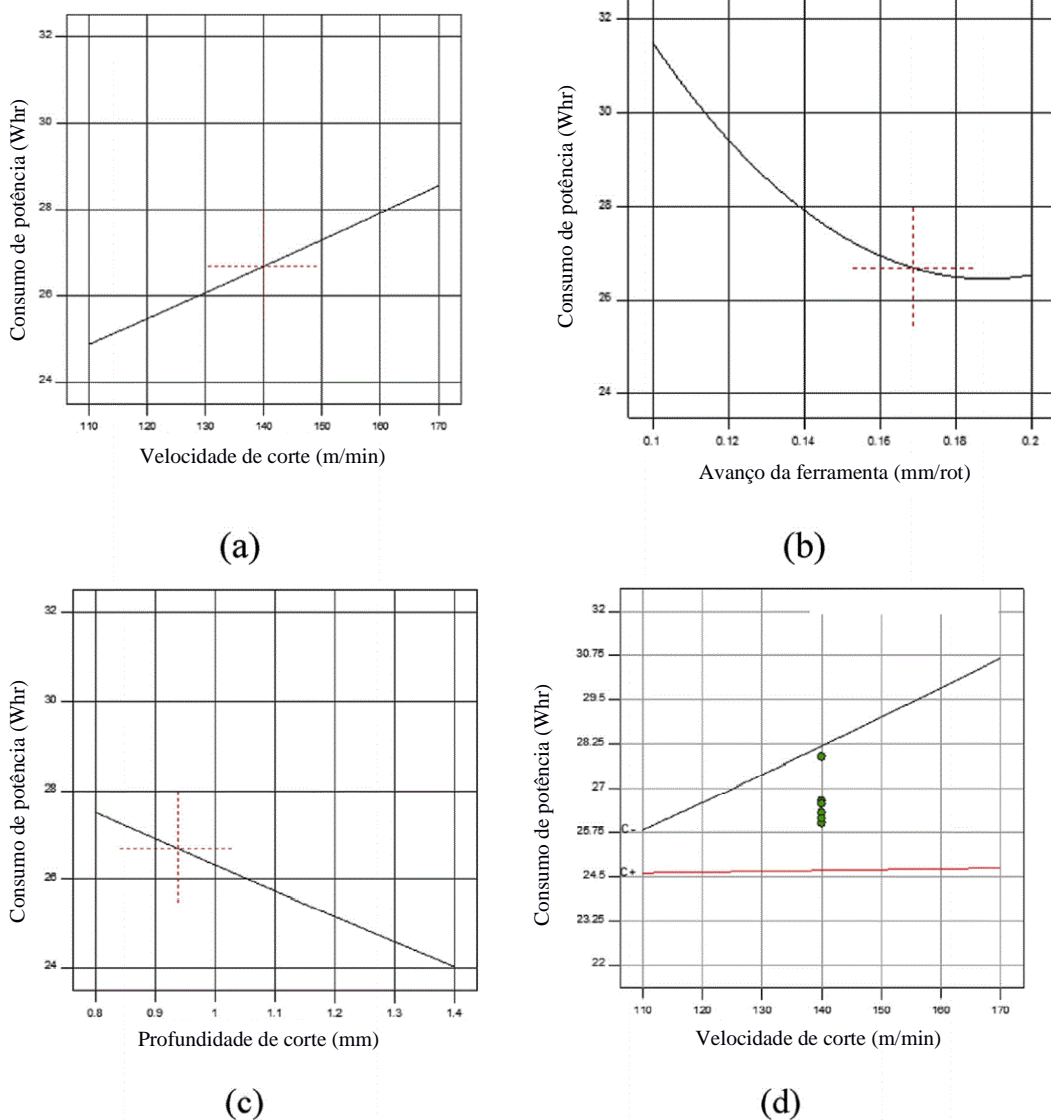


Figura 12 - Influência dos diferentes parâmetros de corte nos valores da potência de corte (Bagaber e Yusoff, 2017).

2.10. Grau de recalque e deformação angular

No corte ortogonal o grau de recalque é uma medida da quantidade de deformação sofrida pela avara e pode ser usado, entre outras coisas, para calcular a deformação angular associada ao processo de corte. Um grau de recalque elevado significa grande quantidade de deformação e baixa velocidade de saída da avara (Sousa *et al.*, 2015).

O grau de recalque pode ser calculado recorrendo à seguinte equação:

$$Rc = \frac{e'}{e} \quad \text{Eq. (5)}$$

- e' - Espessura da avara após o corte [mm];
- e - Espessura da avara antes do corte [mm].

Adicionalmente, conhecendo este valor, pode conhecer-se também a deformação angular após o corte. Esta variável pode ser calculada utilizando a seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{1 + R_c^2 - 2 \cdot R_c \cdot \sin(\gamma)}{R_c \cdot \cos(\gamma)} \quad \text{Eq. (6)}$$

- R_c - Grau de recalque;
- γ - Ângulo de ataque ortogonal para o modelo de Coulomb [°].

No capítulo 3 está explícita a forma como se pretende obter a espessura da avara após o corte aplicada ao estudo realizado nesta dissertação.

2.11. Síntese

O estudo da maquinabilidade de aços tratados é de extrema importância do ponto de vista industrial. É, por isso, necessária a realização de simulações que permitam estabelecer um conjunto de condições de corte ótimas, quer do ponto de vista tecnológico quer do ponto de vista económico. A correta simulação dos parâmetros de corte podem ter grande impacto na redução de tempos de maquinagem, na segurança do operador da máquina e na previsão de possíveis inconformidades na qualidade da peça final.

No âmbito do corte por arranque de avara e através de operações de corte ortogonal, apresentam-se como solução ferramentas de carbonetos sinterizados com alta resistência ao desgaste. Atualmente, este tipo de ferramentas já é mais utilizado que o de aços rápidos, por ter muito maior tempo de vida, por permitir velocidades de corte até duas vezes superior e também por apresentar melhor acabamento (He *et al.*, 2020).

Em relação aos fluidos de corte, a produção sustentável é uma ideologia cada vez mais implementada no setor da indústria da maquinagem. A utilização de óleos vegetais e da redução do volume de fluidos utilizados têm mostrado um forte peso tanto em aspetos de produção como aspetos ecológicos. Os métodos de lubrificação como o MQL ajudam especialmente nestes aspetos, melhorando o aproveitamento do fluido, a segurança dos operadores e a qualidade final da peça obtida.

Na indústria, cada componente obtido por maquinagem pode ser submetido a um número elevado de ciclos de utilização. Como tal, é expectável a degradação dos componentes ao fim de um longo período. O estudo dos parâmetros de corte e a obtenção das propriedades do material mais favoráveis de acordo com a sua composição e estrutura, recorrendo a tratamentos térmicos para o efeito, têm um papel fundamental na durabilidade da peça e na qualidade constante dos produtos obtidos.

3. Metodologia - Simulação numérica da maquinagem por elementos finitos - AdvantEdge®

3.1. Aspetos gerais

O método por elementos finitos tem sido uma ferramenta muito popular na análise de operações de maquinagem, em particular para o estudo das forças e temperaturas envolvidas no processo de corte.

Neste capítulo é abordada a aplicação do software FEM (Finite Element Method) como meio de previsão do comportamento termomecânico da maquinagem. Um software de simulação por elementos finitos aplicado aos processos de maquinagem, permite modelar uma peça apta a sofrer deformação por parte de uma ferramenta rígida com movimento previamente definido, tendo como finalidade a previsão das respostas termomecânicas deste sistema.

Mediante a definição dos parâmetros de corte no software, é possível avaliar a maquinabilidade de um processo de corte através da previsão das forças de corte, da distribuição de temperaturas, do desgaste da ferramenta, das tensões residuais na superfície maquinada e da qualidade de superfície.

Os dados de entrada envolvem a conversão de parâmetros e condições de corte para a linguagem que o software reconheça e processe, onde a quantidade e definição de dados estabelecidos depende não só do software, mas também do grau de maior ou menor detalhe pretendido nos resultados. Por exemplo, a quantidade de nós a analisar dita a duração da simulação. Quanto mais nós forem analisados, maior será o tempo de simulação e maior precisão terão os resultados obtidos, ou seja, o esforço computacional depende maioritariamente dos dados colocados relativos à definição da malha e à quantidade de dados de saída selecionados.

Todo este processo segue uma metodologia semelhante para qualquer simulação que se pretenda realizar:

- **Peça:** São selecionadas as dimensões do bloco a cortar, assim como as propriedades do material em análise. Neste software em específico, é disponibilizada uma lista de materiais que facilita e acelera bastante o trabalho do utilizador. Contudo, também é possível uma seleção mais aprofundada e precisa das propriedades termomecânicas do material. Há ainda a possibilidade de importação de ficheiros CAD com geometrias pré-desenhadas.
- **Ferramenta:** Analogamente à peça, definem-se as geometrias da ferramenta de corte, como por exemplo o ângulo de ataque (rake angle) e de saída (clearance angle) e o raio da aresta de corte no caso de corte ortogonal. A escolha adicional de parâmetros geométricos (ângulos de posição e de inclinação da aresta de corte) acontece quando se pretende analisar um processo de corte tridimensional e, tal como na peça, também é possível importar modelos CAD da ferramenta que se pretende utilizar. Adicionalmente também é possível definir as camadas de revestimento da ferramenta e estabelecer modelos de desgaste.

- **Processo:** Neste tópico são atribuídos valores às grandezas de corte, como a velocidade de corte, o avanço da ferramenta, profundidade e comprimento de corte, etc. Pode estabelecer-se também a temperatura inicial da peça.
- **Coeficiente de atrito:** Esta é provavelmente a parte mais importante de todo o processo de atribuição de parâmetros. Um correto uso deste tipo de software implica uma escolha acertada deste coeficiente, uma vez que afeta diretamente os resultados das forças de corte e de avanço, das temperaturas, do desgaste e das tensões residuais. As regiões de contacto e as condições de atrito entre a avara e a ferramenta são influenciadas por parâmetros como a velocidade de corte, o avanço, o ângulo de ataque e os tipos de materiais que entram em contacto. O atrito é um mecanismo permanente no contacto entre duas superfícies (apara/ferramenta) e, por isso, é um parâmetro de extrema importância nesta análise.
- **Simulação:** Os dados aqui selecionados definem o modo como a simulação decorre. Aqui estabelece-se o tipo de malha, o grau de definição, o número de nós e seleciona-se (ou não) quebra avara na ferramenta.

Finalizado o processamento, o utilizador tem à disposição um conjunto de informação resultante dos cálculos numéricos efetuados: distribuição de temperaturas, a potência e as forças de corte, as tensões e as deformações envolvidas, o desgaste da ferramenta, a qualidade superficial entre outras, sob forma gráfica ou tabelada.

A grande vantagem do uso de softwares FEM na maquinagem reside na possibilidade de testar uma grande gama de parâmetros, condições, materiais e ferramentas de corte sem a necessidade de envolver custos associados a ferramentas, materiais e máquinas-ferramenta para além do tempo envolvido, apesar da simulação numérica também necessitar do tempo de simulação. Permitem desta forma diminuir consideravelmente o número de iterações de parâmetros a aplicar num processo tornando-o mais eficiente. Atualmente os softwares FEM são cada vez mais uma ferramenta indispensável para o estudo da maquinagem e do processo de formação da avara, pois permitem a aquisição de conhecimento que dificilmente seria obtido experimentalmente.

De modo geral todos os softwares FEM aptos a simular corte por arranque de avara seguem uma metodologia semelhante. Na Figura 13 é mostrado o fluxograma da típica arquitetura destes softwares.

A escolha de software de elementos finitos para análise de maquinagem é um fator importante para determinar a qualidade no contexto da análise que pode ser realizada. Os três softwares mais utilizados na análise de parâmetros de maquinagem são o Deform™, Abaqus™ e AdvantEdge™ Tabela 6. Dada a complexidade do método dos elementos finitos, a escolha do software é muito importante para o tipo de análise.

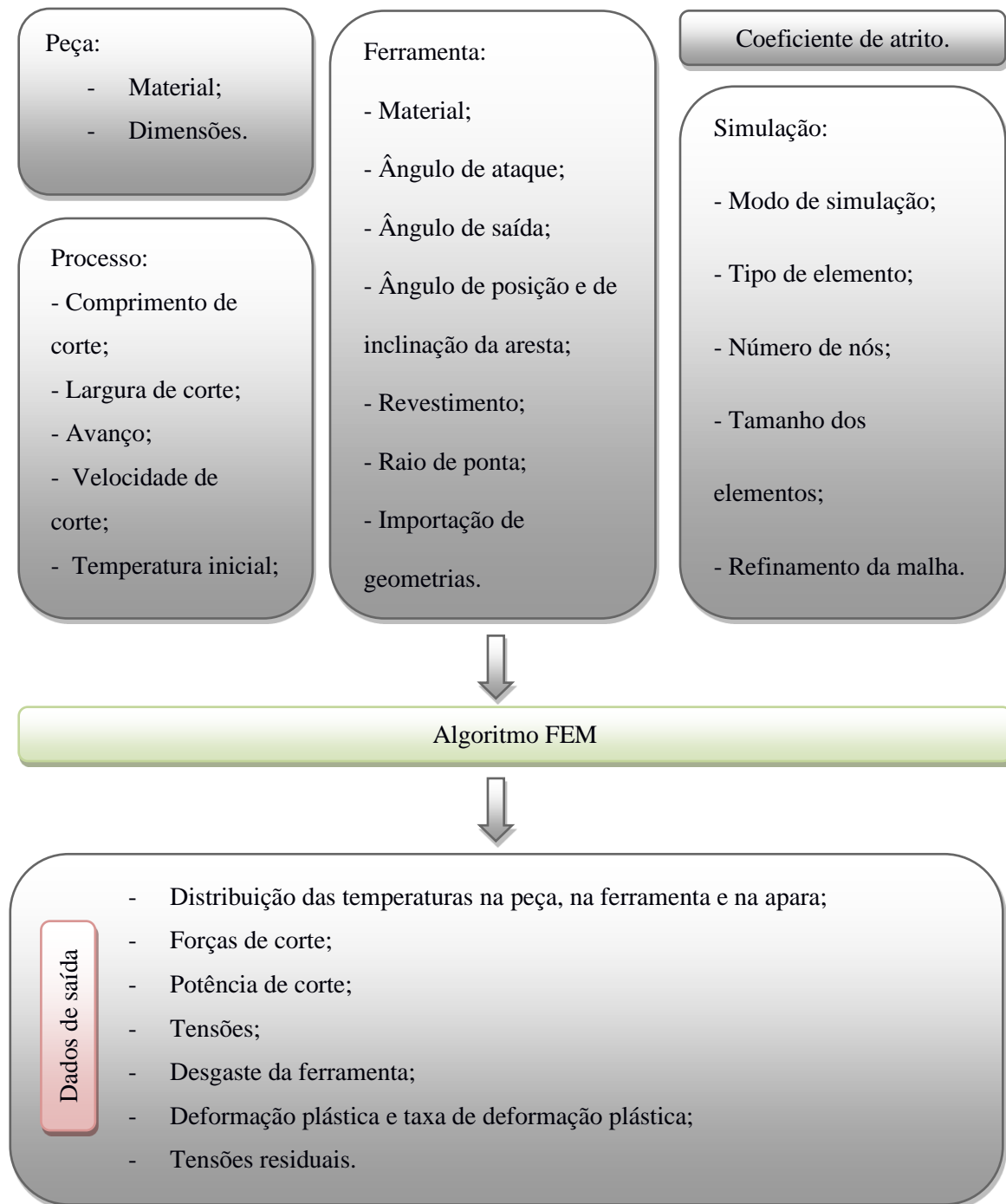


Figura 13 - Fluxograma da arquitetura do Advantedge®.

O AdvantEdge® é um software desenvolvido pela Third Wave Systems®, é constituído por um pacote explícito/dinâmico de modelação por elementos finitos, especializado em processos de corte de metal para previsão do seu comportamento termomecânico. Detém as características necessárias para modelar o processo de corte, através de capacidades adaptativas de renovação da malha para resolução de múltiplas escalas de comprimento.

O software AdvantEdge® foi concebido especificamente para simular o corte por arranque de apara, incorporando módulos de maquinagem 2D e 3D, para operações como torneamento, fresagem, furação, sangramento, roscagem entre outros. Possui uma interface muito intuitiva, com janelas simples para a introdução dos parâmetros e definição das geometrias de corte, bastando poucos passos para iniciar uma simples simulação. A malha de elementos finitos adaptativa é gerada automaticamente, mas é deixado ao utilizador o controlo sobre o seu refinamento. Adicionalmente, é disponibilizada uma extensa biblioteca de metais e ligas normalmente utilizados em engenharia, incluindo materiais utilizados na indústria aeronáutica.

Devido a ser um software muito intuitivo e prático, o AdvantEdge® não permite ao utilizador a configuração de certos parâmetros de baixo nível, tais como interações de contacto, condições de fronteira e algoritmos de resolução.

Na Tabela 6 estão representadas algumas características do software AdvantEdge®.

Tabela 6 - Características do AdvantEdge™, Deform™ e Abaqus™ (Santos das Neves, 2010).

Software	AdvantEdge®	Abaqus®	Deform®
Preparação	Preparação rápida e intuitiva; Biblioteca de geometrias de ferramentas disponíveis.	Preparação pouco intuitiva; Definição manual da ferramenta e peça.	Utilização de módulos pré-definidos; Geometria da ferramenta importada do CAD.
Materiais disponíveis	Vasta biblioteca de materiais e ligas, incluindo ligas aeroespaciais.	Biblioteca de materiais disponível; Definição manual e detalhada das propriedades dos materiais.	Vasta biblioteca de materiais; Editor de novos materiais.
Malha adaptativa	Recurso a malha adaptativa, mas o seu controlo não é permitido.	Controlo dos parâmetros.	Controlo parcial dos parâmetros.
Controlo	Alterações pouco permitidas.	Elevado controlo; Permissão de modificar os algoritmos FEM.	Algum controlo permitido, mas os algoritmos FEM não podem ser manipulados.

Nesta dissertação utilizou-se o AdvantEdge® para simular a maquinagem em três aços utilizados na indústria dos moldes. Foram utilizadas configurações experimentais reportados na literatura para desenvolver e validar os modelos numéricos desenvolvidos. Contudo, achou-

se por bem adaptar os testes à realidade atual, nomeadamente no que diz respeito às ferramentas, que têm vindo a evoluir no mercado de ano para ano.

3.2. Análise FEM - Modelo de Johnson-Cook

O sucesso e a confiabilidade do modelo de elementos finitos dependem fortemente de três aspetos: modelo utilizado que define o comportamento do material quando sujeito a deformação (Power Law, Wright-Batra, Johnson-Cook, Zerili-Armstrong, Bodner-Partom), condições de contorno (atrito, transferência de calor, etc.), e modelo e métodos numéricos (Euler, Lagrange, arbitrário Lagrange-Euler, etc.) (Jiang, Yan and Rong, 2013).

O modelo Johnson-Cook é usado na modelação de processos de maquinagem e previsão de forças, temperatura e tensões de corte na maquinagem. É um modelo constitutivo semi-empírico que prevê o fluxo de tensões no material quando sujeito a altas taxas de deformação e temperaturas elevadas (Ning and Liang, 2018). Este modelo pode ser expresso segundo a seguinte equação, à qual o programa recorre no processamento da simulação:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}} \right)^m \right) \quad \text{Eq. (7)}$$

onde **A** é a tensão de cedência (MPa), **ε** a deformação plástica, **$\dot{\varepsilon}$** a taxa de deformação plástica, **T** a temperatura do material da peça, **T_{melt}** a temperatura de fusão do material da peça e **T_{ref}** a temperatura ambiente. As restantes variáveis representam parâmetros de ajuste ao modelo.

Estas constantes que fazem parte do modelo de Johnson-Cook podem ser encontradas quer na literatura, quer em trabalhos no âmbito de simulação numérica, quer por autores que realizaram ensaios mecânicos para encontrar esses parâmetros (Priyadarshini, Pal and Samantaray, 2010).

As relações entre os vários parâmetros deste modelo descrevem o comportamento do material sob várias condições mecânicas e térmicas.

Diversos autores efetuaram trabalhos de simulação numérica e validação recorrendo a este mesmo software.

Tang, Huang and Xie (2011) desenvolveram um modelo de elementos finitos, recorrendo ao modelo de Johnson-Cook, que foi construído e calibrado com base em resultados experimentais de outros autores para o aço AISI D2. Foi averiguada a influência da velocidade de corte, profundidade de corte, tensão residual, ângulo de corte e temperatura da aresta de corte da ferramenta e foram comparados os valores simulados com os experimentais, com o objetivo de testar o desempenho do software e a concordância entre os resultados numéricos e experimentais. Foram obtidos resultados bastante satisfatórios, com erros, face aos resultados experimentais, bastante reduzidos (1,5%-12%), o que demonstra uma precisão bastante elevada do software que se pretende utilizar nesta dissertação, recorrendo ao mesmo modelo do material.

3.3. Introdução dos dados da simulação

3.3.1. Criação de um projeto

Na criação de um novo projeto, define-se o ambiente de modelação 2D ou 3D e o tipo de processo a simular. Para modelação 2D estão disponíveis processos como corte ortogonal (com opção de micro torneamento), fresagem concordante e discordante, entre outros. A modelação 3D dispõe de torneamento exterior e interior, fresagem, furação, sangramento e roscagem. Após a seleção do tipo de processo fica à disposição do utilizador o menu para a introdução dos dados de entrada, nomeadamente da definição da peça, da ferramenta, do processo e da simulação.

3.3.2. Definição da peça

É possível definir a geometria da peça de duas formas. A primeira e bastante mais personalizada consiste em importar um ficheiro CAD, e a segunda consiste na definição da geometria de um retângulo (caso 2D) ou de um paralelepípedo (caso 3D) de altura [h], comprimento [L], e largura da peça [w] (esta última em particular para a modelação 3D). De entre estes parâmetros há que referir alguns cuidados a ter, como, por exemplo, o valor a atribuir ao comprimento [L] deve ser suficiente para que seja verificada estabilidade nas condições térmicas e mecânicas do corte nesse intervalo. A escolha do material da peça também pode ser efetuada de duas maneiras. A primeira consiste na definição pormenorizada das propriedades (seleccionando a opção “Custom” na seleção do material) com a possibilidade de recorrer a alguns modelos disponíveis no AdvantEdge®, método que permite obter resultados com maior detalhe. A segunda consiste em seleccionar o material da peça na biblioteca de materiais.

Neste trabalho foi feita uma análise através do modelo Johnson-Cook, para todos os materiais estudados, e, para o efeito, recorreu-se ao primeiro método de escolha do material, ou seja, optou-se pela seleção detalhada dos parâmetros relativos ao modelo de Johnson-Cook.

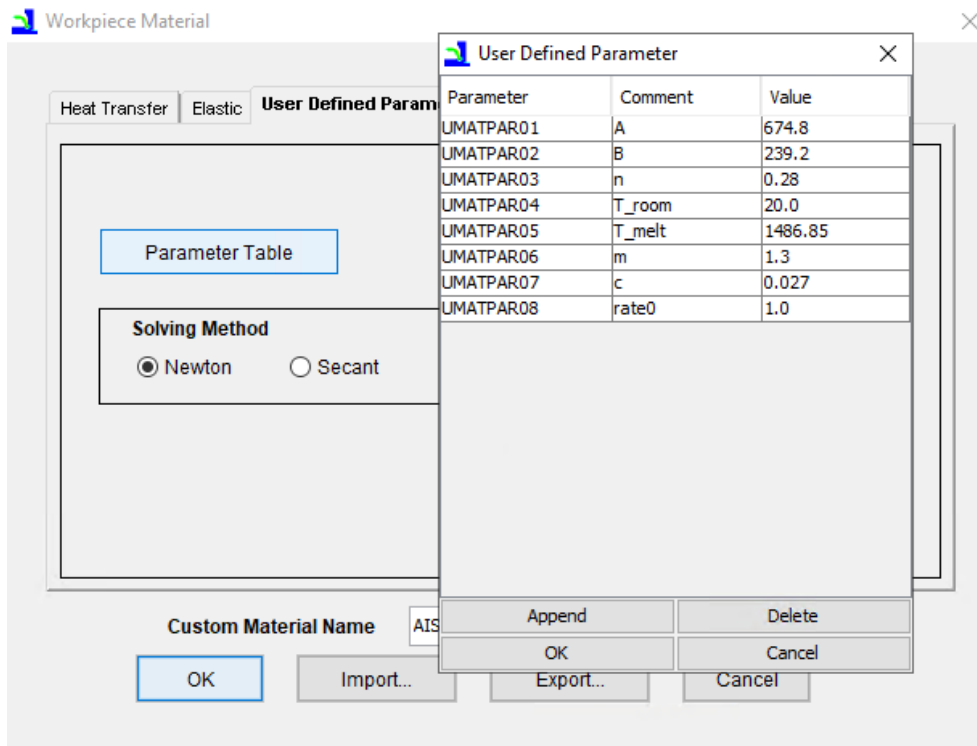


Figura 14 - Definição do material da peça de acordo com o primeiro método.

Os parâmetros apresentados na Figura 14 são facilmente retirados da literatura, apresentando valores diferentes para cada material estudado.

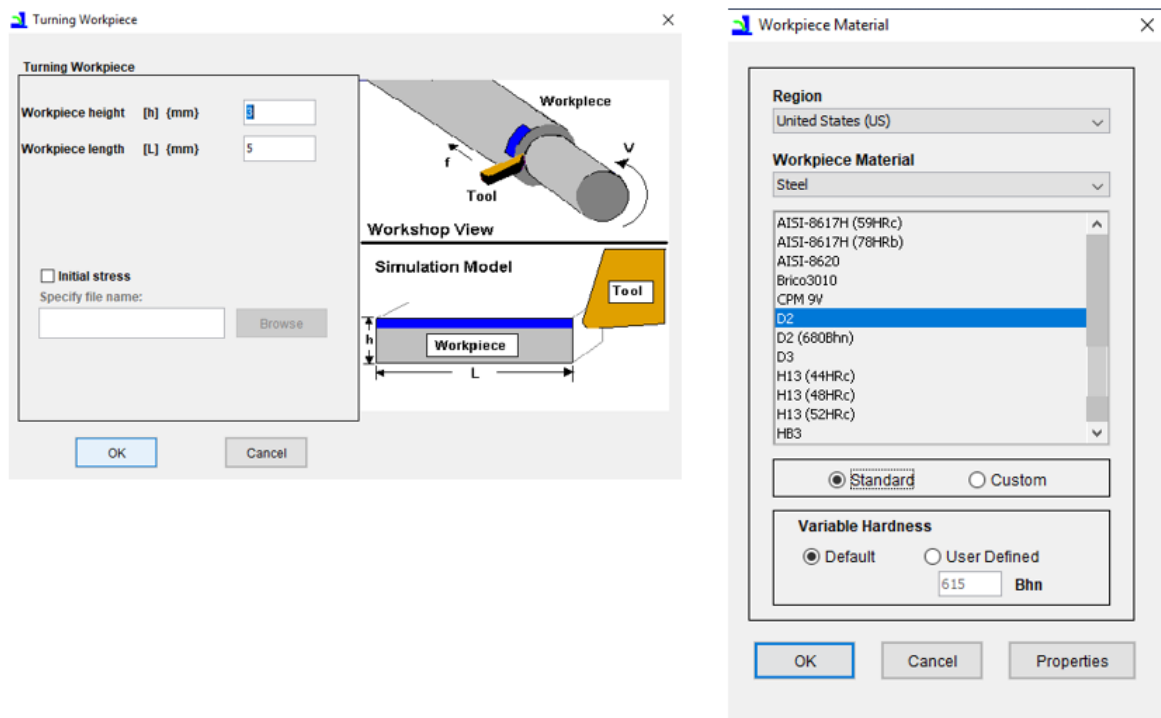


Figura 15 - Definição das dimensões e do material da peça de acordo com o segundo método.

3.3.3. Definição da ferramenta de corte

A geometria da ferramenta de corte pode ser importada através de modelos CAD, ou então a partir de alguns parâmetros a colocar no software dependendo se a modelação é em 2D ou 3D. Para o corte ortogonal, os dados a colocar são o raio da aresta de corte [r] (0.02 mm para todos os casos estudados), o ângulo de ataque [a], e o ângulo de saída [b]. Nas opções avançadas é possível definir adicionalmente os comprimentos das faces de ataque e de saída, tal como a definição do grau de refinamento dos elementos da malha da ferramenta. Na Figura 16 apresentam-se as janelas de definição da geometria da ferramenta para o caso 2D.

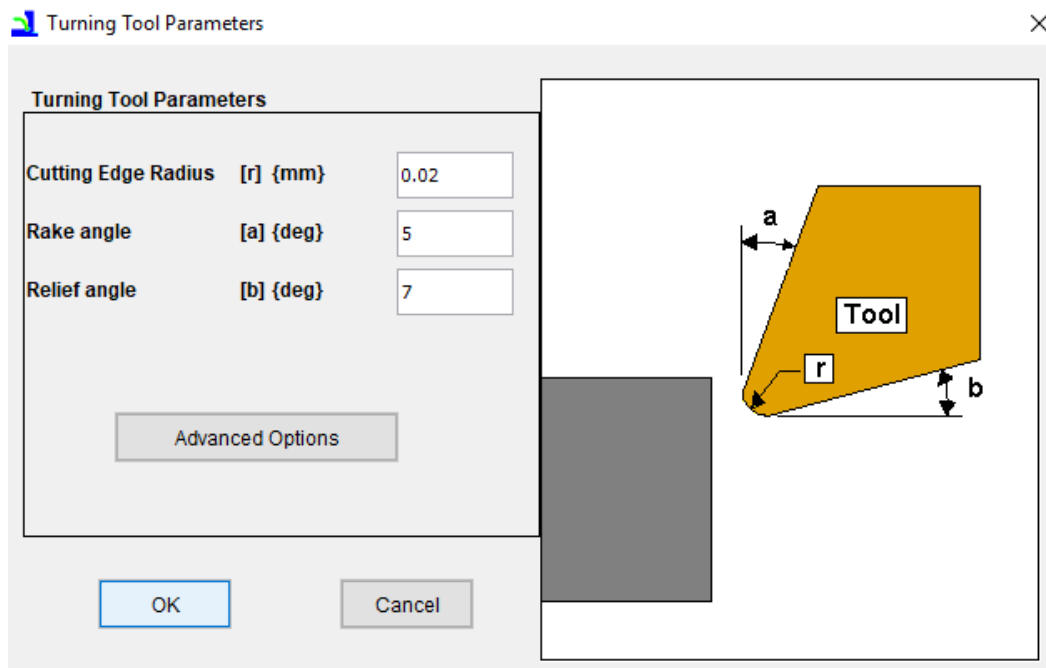


Figura 16 - Definição da geometria da ferramenta de corte para os casos 2D (software AdvantEdge®).

O AdvantEdge®, estabelece duas formas para definir o material da ferramenta de corte, sendo que a primeira consiste na personalização integral das suas propriedades termomecânicas, e a segunda em recorrer à biblioteca de materiais pré-definidos para ferramentas de corte. Nesta dissertação, optou-se pelo uso dos materiais disponíveis na base de dados do software. A Figura 17 ilustra a janela de seleção do material da ferramenta.

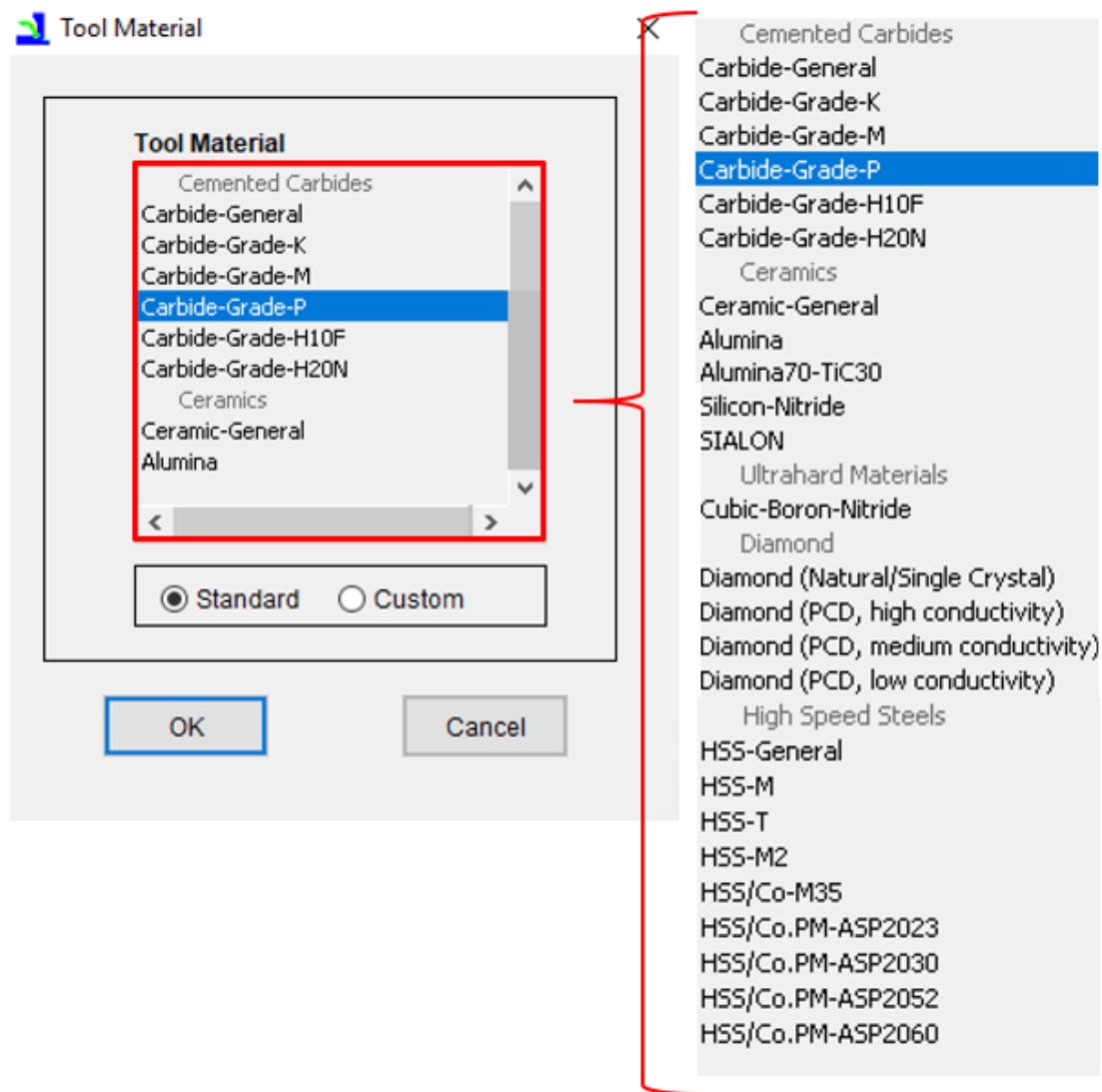


Figura 17 - Seleção do material da ferramenta (software AdvantEdge®).

Adicionalmente o software permite estabelecer camadas de revestimento para as ferramentas de corte, entre as quais estão disponíveis os, TiN, Al₂O₃, TiC e o TiAlN. O AdvantEdge® também permite a definição manual das propriedades termomecânicas dos materiais de revestimento, contudo a sua utilização não foi necessária.

3.3.4. Definição dos parâmetros e condições de corte

A introdução dos dados relativos aos parâmetros de corte é semelhante, tanto para ambiente 2D como 3D. É necessário definir o avanço [f], a profundidade de corte [doc], o comprimento de corte [loc], a velocidade de corte [V] e a temperatura inicial da peça [To]. Na Figura 18 está apresentada a janela de introdução dos dados relativos aos parâmetros de corte.

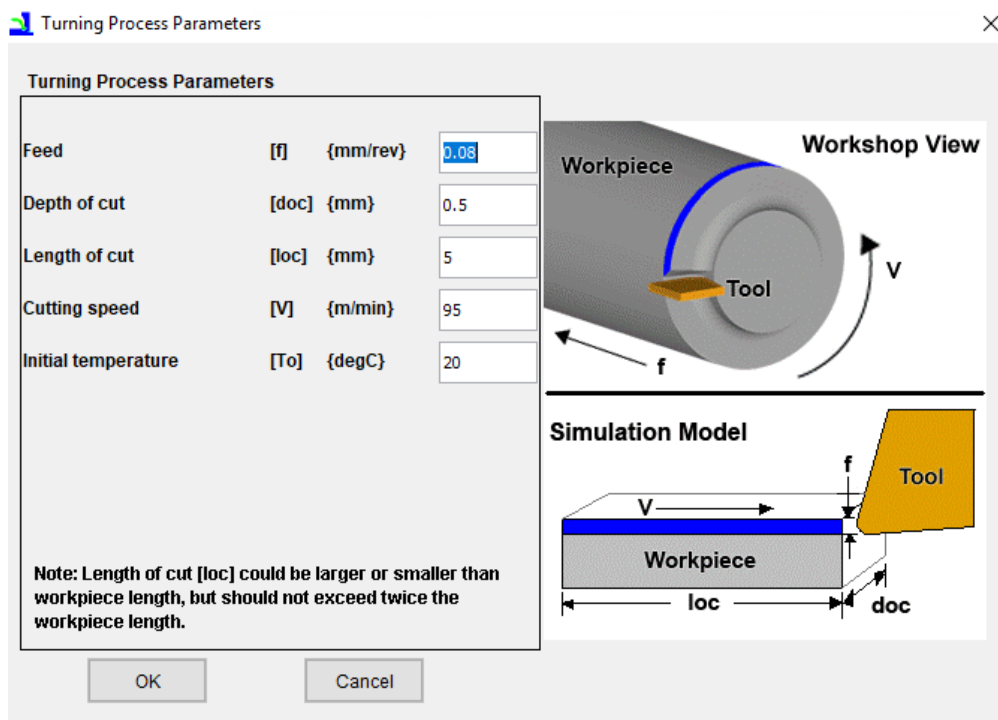


Figura 18 - Introdução dos parâmetros de corte.

Outro parâmetro de grande importância, como já referido no capítulo 2, é o coeficiente de atrito e tem de ser igualmente introduzido no software como parâmetro de entrada. É calculado com base nas forças de corte geradas no processo e no ângulo de ataque da ferramenta, e para tal serão consultadas forças de corte na bibliografia para ser possível simular o processo. Foi então calculado com base na equação 2, presente no capítulo 2.

Por vezes alguns autores apresentam inclusive uma estimativa para o coeficiente de atrito (μ). De qualquer das formas, a definição do valor de μ a adotar no software FEM necessita de uma validação prévia antes de se dar início a uma série de simulações.

Por fim resta descrever a opção de refrigeração do corte. Os dados de entrada são respetivamente o coeficiente de convecção [h], e a temperatura do fluido de corte. Também é possível definir com algum detalhe o modo de ação do fluido, a partir de opções tais como por imersão ou localização da ação do fluido.

De todos estes parâmetros, o coeficiente de transferência convectivo [h], com unidades de $[W/m^2K]$, exige o estabelecimento de cálculos analíticos adicionais tal como a definição de algumas condições para o fenómeno de transferência de calor da interface para a ferramenta para o fluido de corte.

Nesta dissertação não foi utilizado nenhum sistema de refrigeração.

3.3.5. Definição dos parâmetros de simulação

Antes de se submeter os dados para o processamento é necessário definir os parâmetros relativos à simulação, como indica a Figura 19.

O AdvantEdge® dispõe de dois modos de simulação. O primeiro é um modo rápido, [Demonstration mode], que embora não garanta alta precisão dos resultados, permite executar testes preliminares para eventuais ajustes dos dados de entrada. O segundo modo, [standard mode], exige um tempo de processamento superior garantindo maior precisão dos resultados. Dispõe de opções avançadas como a análise às tensões residuais onde o software estabelece um patamar mínimo do número de elementos intervenientes, resultado do reforço do refinamento na superfície da peça. Com a opção do teste das tensões residuais ativa é disponibilizada a opção de refinamento da malha em profundidade.

É possível definir adicionalmente o número de nós intervenientes na simulação por elementos finitos, assim como parâmetros de refinamento da malha, o fator de refinamento da malha adaptativa assim como a previsão de um quebra aparas.

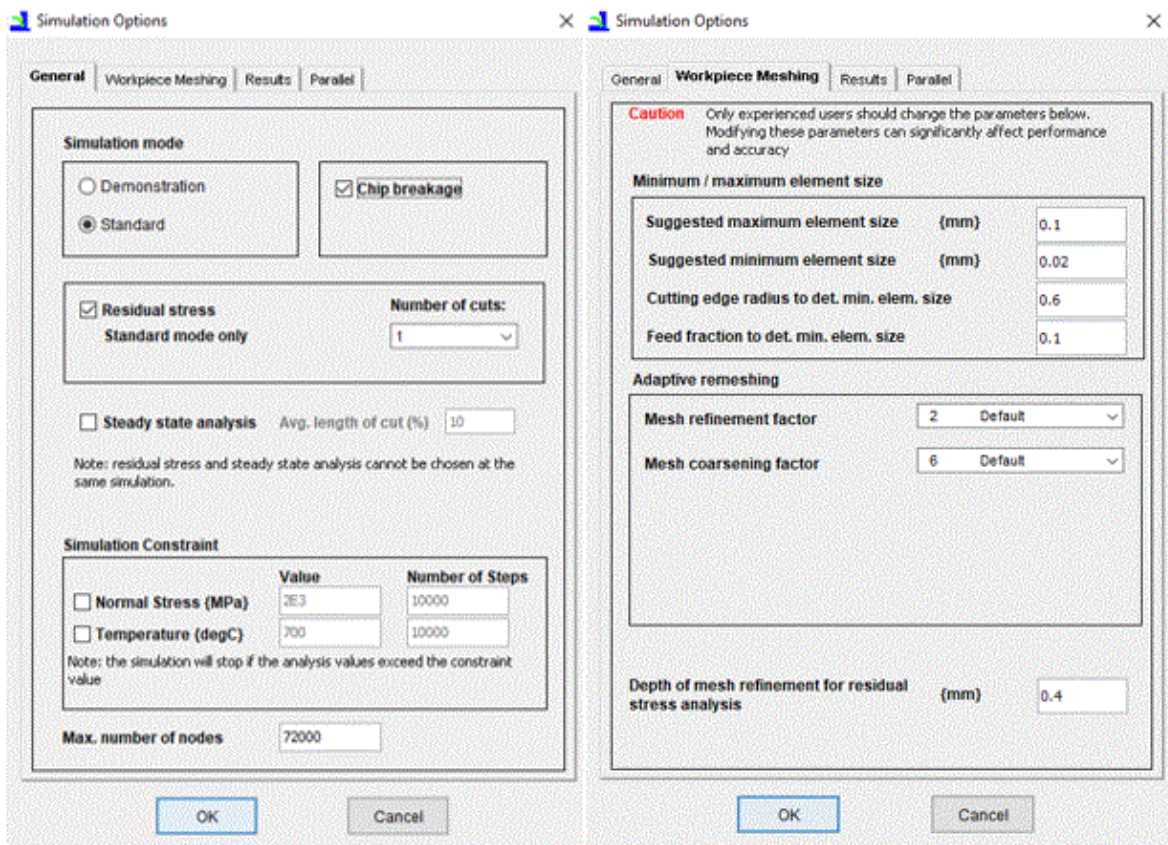


Figura 19 - Definição dos parâmetros de simulação no AdvantEdge®.

3.4. Recolha dos resultados e validação - Tecplot®

A validação dos resultados do software AdvantEdge® levada a cabo nesta dissertação engloba os seguintes dados de saída de modo a serem comparados com os dados experimentais recolhidos na literatura. São eles as forças, e potências de maquinagem, a temperatura de corte, o grau de recalque e a deformação angular.

A exposição dos resultados é feita pelo software Tecplot®, que funciona paralelamente com o AdvantEdge®. O seu ambiente de trabalho está exposto na Figura 20.

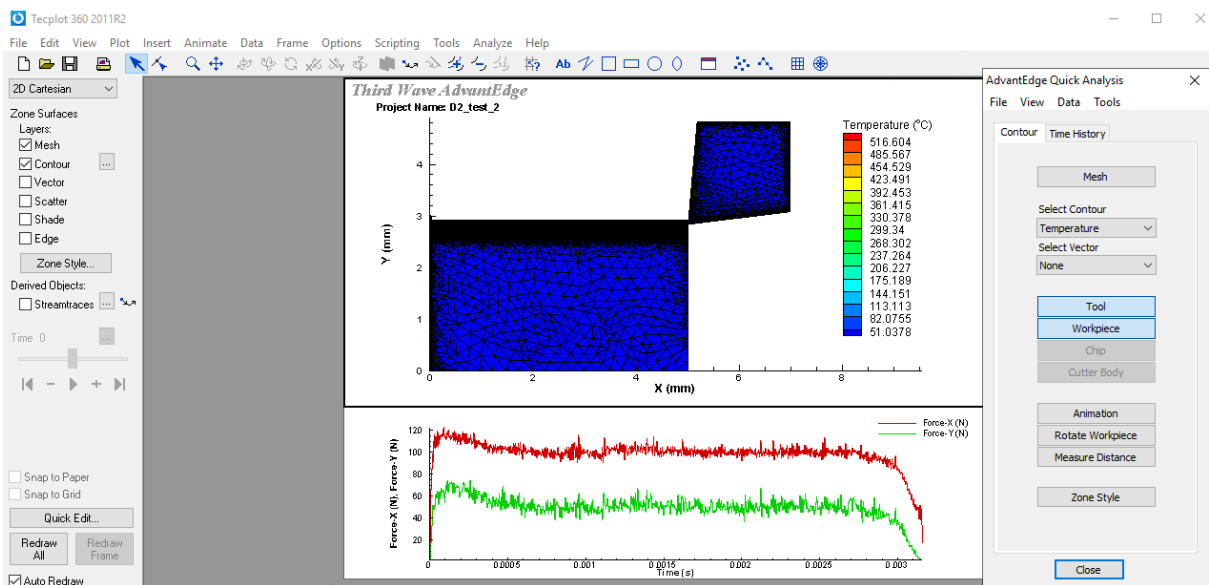


Figura 20 - Ambiente de trabalho do Tecplot®.

Na Figura 20 está ainda explícito um exemplo da malha aplicada em 2D na ferramenta de corte e na peça. Quando se ilustra o processo de corte também é visível a malha na avara durante o seu escoamento. Ambas as forças de corte são também exibidas ao longo do tempo.

Os resultados apresentam-se através de frames sucessivas do desenvolvimento dos parâmetros de saída com o comprimento de material cortado. É o exemplo da distribuição da temperatura, das forças, tensões, entre outros dados possíveis de visualizar. Outras informações são possíveis de ser retiradas, como o ângulo de corte, a forma da avara, o desgaste da ferramenta de corte (quando ativada e definida essa opção). A título de exemplo, expõem-se na Figura 21 resultados visualizados no Tecplot® para a distribuição da temperatura.

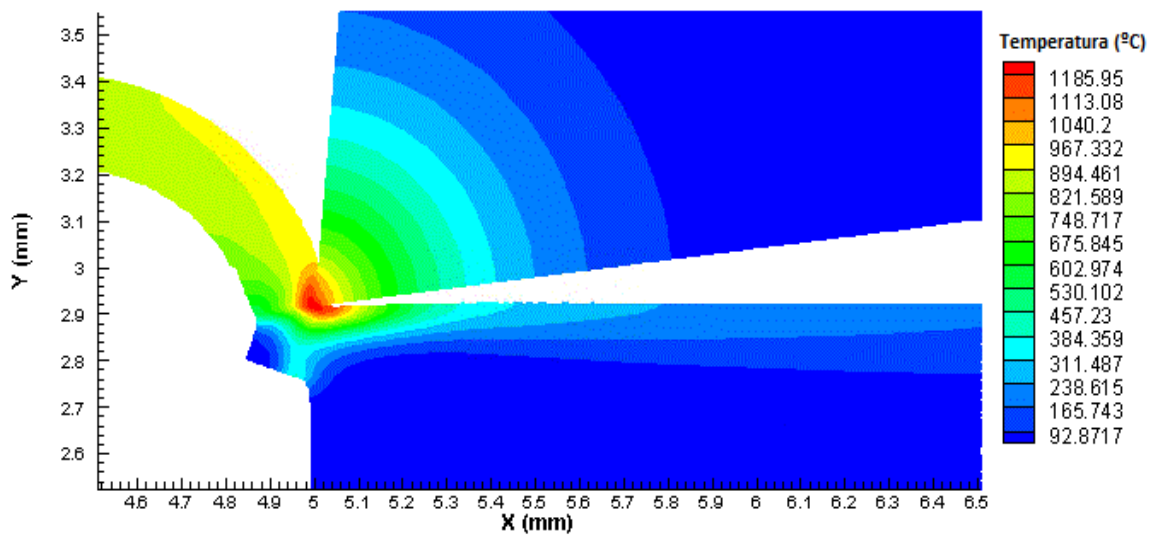


Figura 21 - Distribuição das temperaturas durante o processo de corte extraídos do Tecplot®.

3.4.1. Forças e temperaturas de corte

A apresentação gráfica permite visualizar a informação de saída, é o exemplo da temperatura máxima da ferramenta de corte, da força de corte, da força de avanço, da potência de corte, das tensões residuais, entre outros. Na Figura 22 são mostrados os gráficos extraídos do Tecplot®, com informação relativa às forças de corte (F_x) e de avanço (F_y) ao longo do tempo.

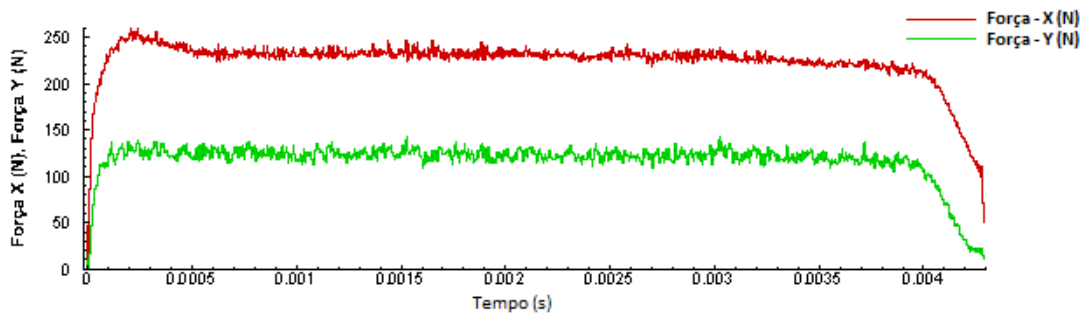


Figura 22 - Forças de corte (F_x) e de avanço (F_y) ao longo do tempo extraídas do Tecplot®.

Se for pretendido, é ainda possível obter o valor médio destas forças, bem como a temperatura média e a potência de corte do processo. A Figura 23 mostra o valor de cada uma destas componentes extraídos após a análise da simulação no Tecplot®.

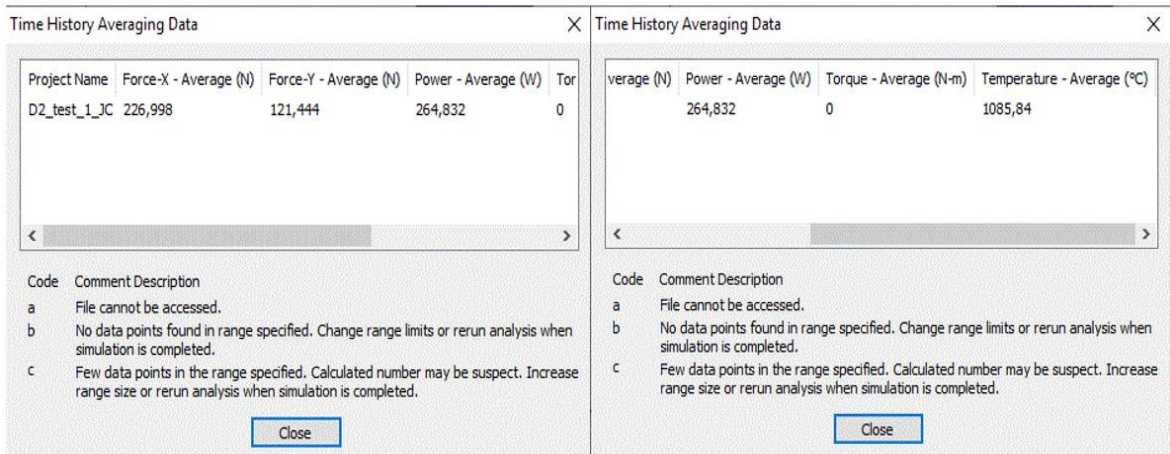


Figura 23 - Valores médios das forças de corte e de avanço, da temperatura e da potência de corte.

Deste processo resulta então a análise comparativa entre as forças de corte das simulações efetuadas e do processo experimental consultado na literatura.

Como já foi mencionado anteriormente, na seleção dos parâmetros da ferramenta é necessário especificar tanto o ângulo de ataque como o ângulo de saída ou folga. Na análise dos resultados, as faces associadas a estes ângulos têm um papel muito importante quando se pretende fazer uma análise mais meticulosa e aprofundada do comportamento térmico e mecânico da ferramenta durante o processo de corte. É possível, por exemplo, averiguar a zona onde a temperatura de corte atinge o seu pico. O Figura 24 mostra a distribuição das temperaturas para as diferentes zonas da ferramenta ao longo do comprimento da face de ataque.

Da mesma forma que se aplica a análise à face de ataque é possível analisar a face de saída, selecionando, nos parâmetros de simulação do Tecplot®, ambas as faces ou apenas a segunda.

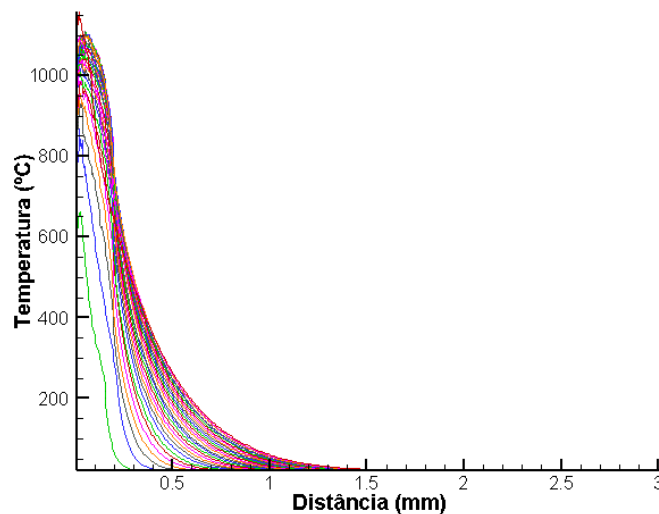


Figura 24 - Distribuição das temperaturas ao longo da face de ataque e/ou de incidência da ferramenta extraídas do Tecplot®.

Cada linha representa uma zona de análise do software da face de ataque que, à medida que se vai afastando do ponto de contacto (aresta de corte), vai diminuindo significativamente a sua temperatura.

É possível analisar individualmente cada uma destas linhas e, desta forma, prever a zona onde a temperatura atingirá o seu pico. Para isso, basta verificar na Figura 24 a linha que apresenta maiores valores e analisá-la à parte. A distribuição da temperatura aparecerá separadamente num gráfico como é mostrado na Figura 25.

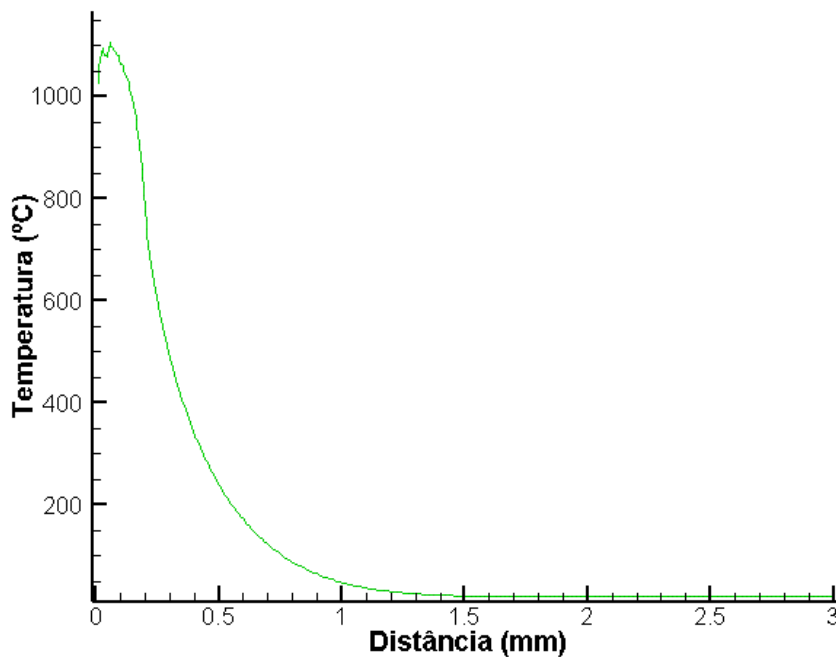


Figura 25 - Análise individual de uma zona específica da face de ataque e/ou saída no Tecplot®.

Este tipo de análise é muito vantajoso para quando se pretende analisar ao pormenor o comportamento destas variáveis e, desta forma, prever eventuais problemas que poderiam surgir se não se recorresse previamente à simulação.

3.4.2. Tensões de corte residuais

Da mesma forma que se procedeu para se saber as temperaturas ao longo das faces de ataque e de saída, pode analisar-se as tensões residuais na peça ao longo de três zonas definidas pelo software: zona esquerda, zona do centro e zona direita da peça (Figura 26). Na Figura 27 está representada a distribuição dessas tensões residuais ao longo da profundidade da peça para estas três zonas distintas.

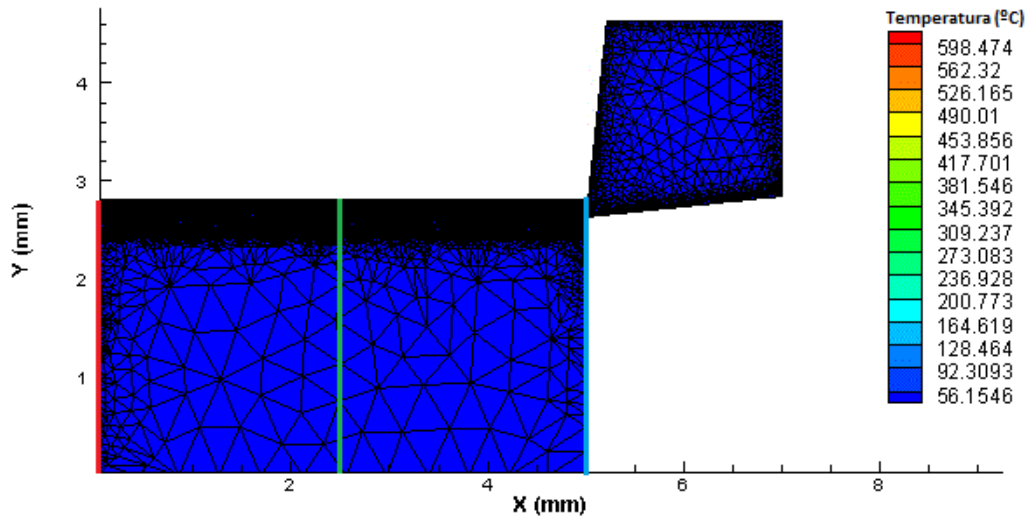


Figura 26 - Zonas de análise das tensões residuais no Tecplot®.

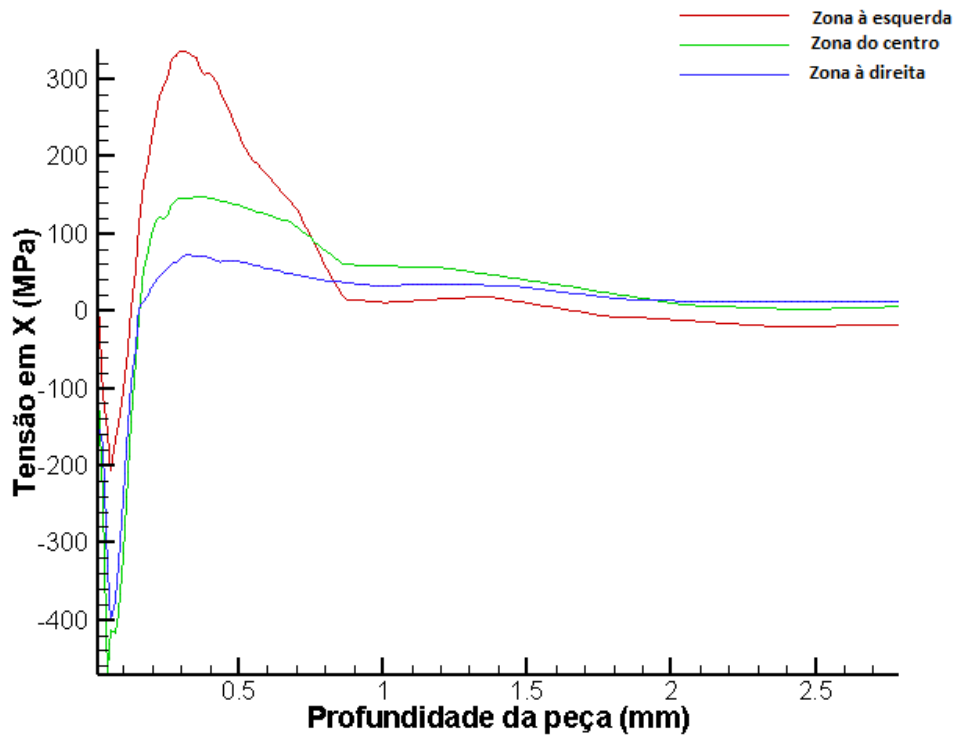


Figura 27 - Distribuição das tensões residuais ao longo da profundidade da peça extraída do Tecplot®.

3.4.3. Grau de recalque e deformação angular

Para obtenção do grau de recalque do processo de corte foi necessário conhecer a espessura da apara após o corte. Para tal, recorreu-se a uma metodologia de medição de distâncias no ambiente de trabalho do Tecplot®.

Em primeiro lugar, é necessário analisar, ao longo do comprimento de corte, a zona mais favorável para a medição. Depois, é importante traçar a linha de medição o mais perpendicularmente possível à face da apara para se obter o valor mais próximo da realidade. Na Figura 28 estão explícitos estes primeiros passos.

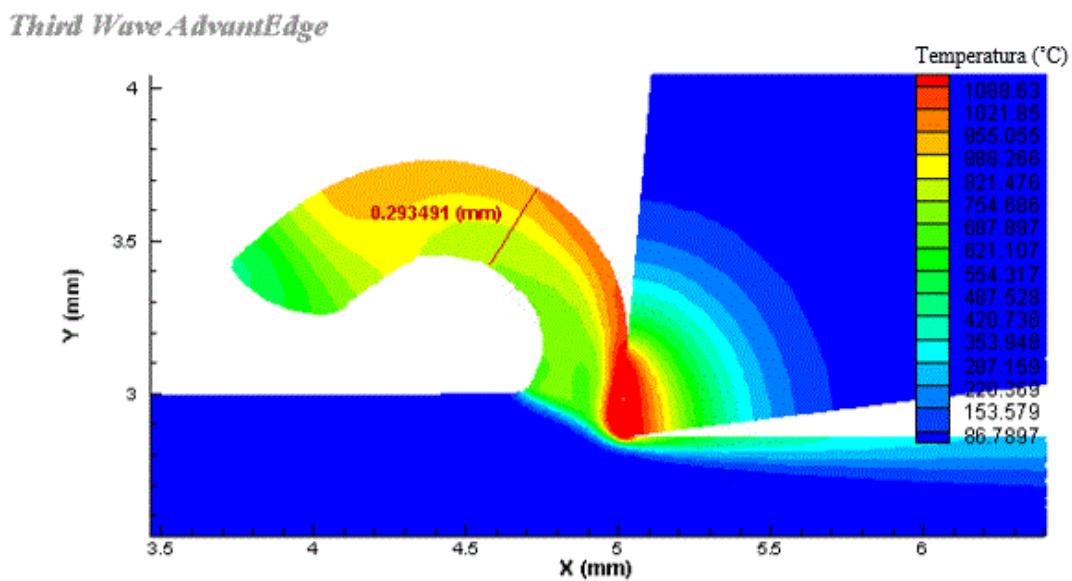


Figura 28 - Processo de medição da espessura da apara após o corte no Tecplot®.

Conhecida a espessura da apara após corte e a profundidade de corte utilizada, é possível calcular o grau de recalque do processo, recorrendo à seguinte equação (5), e posteriormente a deformação angular recorrendo à equação (6).

Relativamente a estes valores conseguidos numericamente, estabeleceram-se alguns critérios relativos à recolha dos dados do software, tais como resultados onde os valores de temperatura e forças não apresentaram estabilidade. O não cumprimento destes requisitos, incluindo a obtenção de grandes desvios dos resultados em relação aos valores experimentais, leva ao reajuste de alguns parâmetros de entrada do software como por exemplo, o coeficiente de atrito, o comprimento de corte ou o número ou o tamanho dos elementos finitos.

4. Análise e discussão dos resultados obtidos

Neste capítulo apresentam-se os resultados das simulações numéricas em corte ortogonal para os três aços estudados.

Esta secção foi dividida em quatro subsecções, cada uma dedicada à análise numérica dos diferentes materiais, e, por fim, uma análise comparativa da maquinabilidade entre os três materiais. Posteriormente, foram tiradas as conclusões relativas ao trabalho numérico realizado nesta dissertação.

Nas simulações numéricas efetuadas no âmbito do presente trabalho avaliaram-se as forças, temperaturas e potências de corte. A Tabela 7, mostra o resumo da literatura usada na validação das simulações no âmbito da dissertação, tendo em conta os autores, o material maquinado, o ambiente de simulação e os dados recolhidos.

Tabela 7 - Literatura consultada.

Autor	Parâmetros J-C	Material	Dados de estudo
Borsos <i>et al.</i> (2017)	Borsos <i>et al.</i> (2017)	AISI 1045	Fa; Fc; T;
Arsecularatne <i>et al.</i> (2006)	Tang, Huang and Xie (2011)	AISI D2	Fa; Fc;
Suresh, Basavarajappa and Samuel (2012) e Kumar e Chauhan (2015)	Zhang, Zhang and Li (2017)	AISI H13	Fa; Fc;

4.1. Aço AISI 1045

O primeiro grupo de simulações numéricas FEM foi feito para o aço AISI 1045. Ning e Liang (2018) estudaram as forças e temperaturas do processo de corte ortogonal do aço AISI 1045, com vista a determinar os parâmetros de Johnson-Cook do material em questão. As constantes J-C foram determinadas com base no mínimo global das diferenças entre as forças calculadas e as forças medidas experimentalmente para cada condição de corte.

Neste trabalho experimental realizado por Ning e Liang (2018) são apresentadas as forças de corte e de avanço experimentais e as simuladas por um processo de análise por elementos finitos, bem como as temperaturas atingidas durante o corte. Estas forças e temperaturas correspondem ao valor médio durante todo o processo de corte.

Não foram retiradas quaisquer conclusões acerca da influência dos parâmetros de corte nas forças e temperaturas de corte, pelo que será efetuada essa mesma análise nesta dissertação.

Tabela 8 - Parâmetros de entrada do software FEM e dados experimentais utilizados nas simulações do aço AISI 1045.

	Parâmetros	FEM	Ning e Liang (2018)
Peça	Comprimento [L]	5 mm	-
	Altura [h]	3 mm	-
	Material	AISI 1045 – modelo de Johnson Cook	AISI 1045 – modelo de Johnson Cook
Ferramenta	Ângulo de ataque [α]	-7 ° e 5 °	-7 ° e 5 °
	Comprimento da face de ataque [q]	2 mm	-
	Ângulo de saída [b]	0	-
	Comprimento da face de saída [p]	2 mm	-
	Raio de gume [r]	0.02 mm	-
	Material	Carboneto grau P	-
	Revestimento	Sem revestimento	Sem revestimento
Processo	Profundidade de corte [doc]	1.2 mm	1.2 mm
	Comprimento de corte [loc]	5 mm	-
	Avanço [f]	0.15 e 0.3 mm	0.15 e 0.3 mm
	Velocidade de corte [V]	200 e 300 m/min	200 e 300 m/min
	Coefficiente de atrito [μ]	Variável*	Não especificado
	Fluido de corte	seco	seco
Simulação	Número máximo de nós	24000	-
	Máximo tamanho do elemento	0.1 mm	-
	Mínimo tamanho do elemento	0.02 mm	-
	Análise de tensões residuais	Ativo	-

Tal como se procedeu para os outros casos, o método de seleção do material da peça foi o mesmo, recorrendo ao modelo de Johnson-Cook. Os valores das variáveis requerentes deste modelo estão especificados na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores das variáveis que interferem com o modelo de Johnson-Cook (Prakash Marimuthu, Thirtha Prasada e Chethan Kumar, 2017).

	Parâmetros [Unidades]	Valor
Térmicos	Condutividade térmica [W/m · °C]	47.7
	Calor específico [J/Kg · °C]	432
Mecânicas	Módulo de Young [Pa]	210E9
	Coefficiente de Poisson	0.3
	Densidade [Kg/m³]	7800
Equação de Johnson-Cook	A [Pa]	553.3E6
	B [Pa]	600.8E6
	c	0.013
	m	1
	n	0.0234
	T_{melt} (°C)	1460
	T_{room} (°C)	20

As condições dos vários testes experimentais estão presentes na Tabela 10. Na Tabela 11 estão representados os resultados experimentais obtidos por Ning e Liang (2018), os resultados obtidos nas simulações e o respetivo erro face aos resultados experimentais.

Relativamente ao ângulo de saída, este parâmetro não é especificado pelo autor dos resultados experimentais, pelo que foi necessário atribuir este valor com o objetivo de chegar a resultados com o menor erro possível. Foi verificada uma grande influência do ângulo de saída da ferramenta no valor da força de avanço, sendo ela progressivamente maior para ângulos de saída mais baixos.

Tabela 10 - Condições de corte utilizadas na simulação e por Ning e Liang (2018).

Teste	Velocidade de corte [m/min]	Profundidade de corte [mm]	Avanço da ferramenta [mm]	Ângulo de ataque [°]	Ângulo de saída [°]
1	200	1.2	0.15	-7	0
2	200		0.15	5	
3	200		0.3	-7	
4	200		0.3	5	
5	300		0.15	-7	
6	300		0.15	5	

Tabela 11 - Resultados experimentais obtidos por Ning e Liang (2018), da simulação e os respectivos erros associados.

Teste	Fc ^e [N]	Fa ^e [N]	Fc ^s [N]	Fa ^s [N]	Erro Fc (%)	Erro Fa (%)	Erro acumulado (%)
1	607	500	578.11	548.66	4.76	9.73	14.49
2	583	402	539.70	412.79	7.43	2.68	10.11
3	1125	740	967.12	731.06	14.03	1.21	15.24
4	976	493	916.12	585.44	6.14	18.75	24.88
5	623	478	517.87	409.02	16.88	14.43	31.31
6	539	326	461.44	278.37	14.39	14.61	29

As Figura 29 e Figura 30 ajudam a compreender o comportamento das forças de corte e de avanço dos vários testes, bem como a comparação entre os resultados experimentais e das simulações.

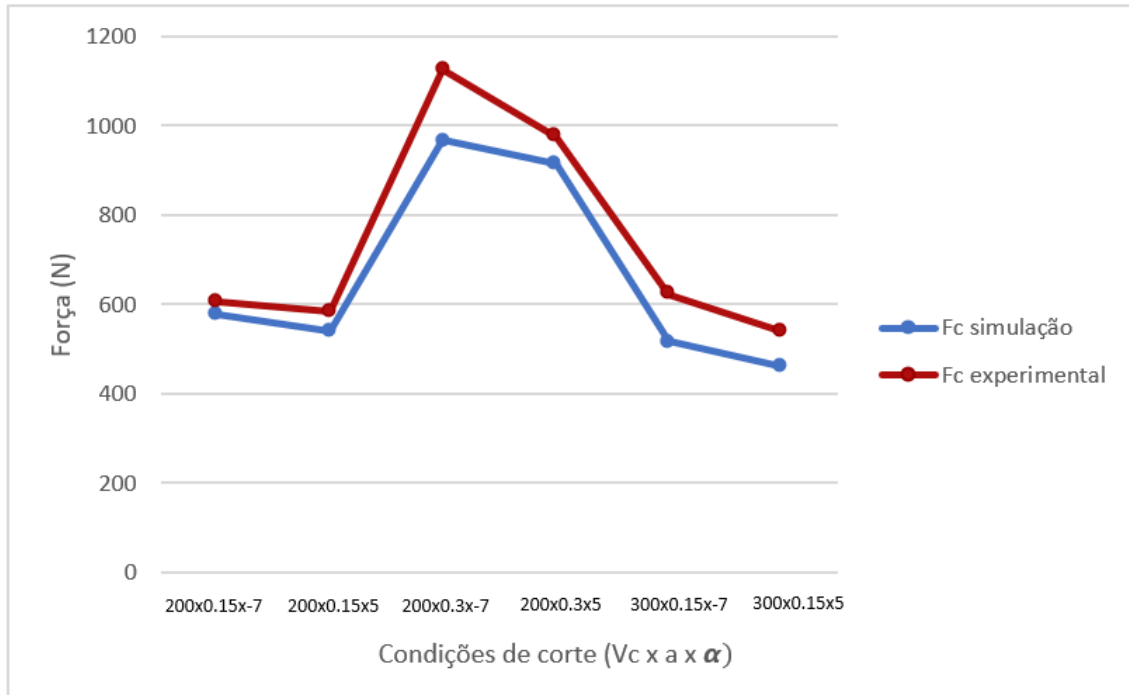


Figura 29 - Comparação entre a força de corte obtida nas simulações e obtida experimentalmente por Ning e Liang (2018).

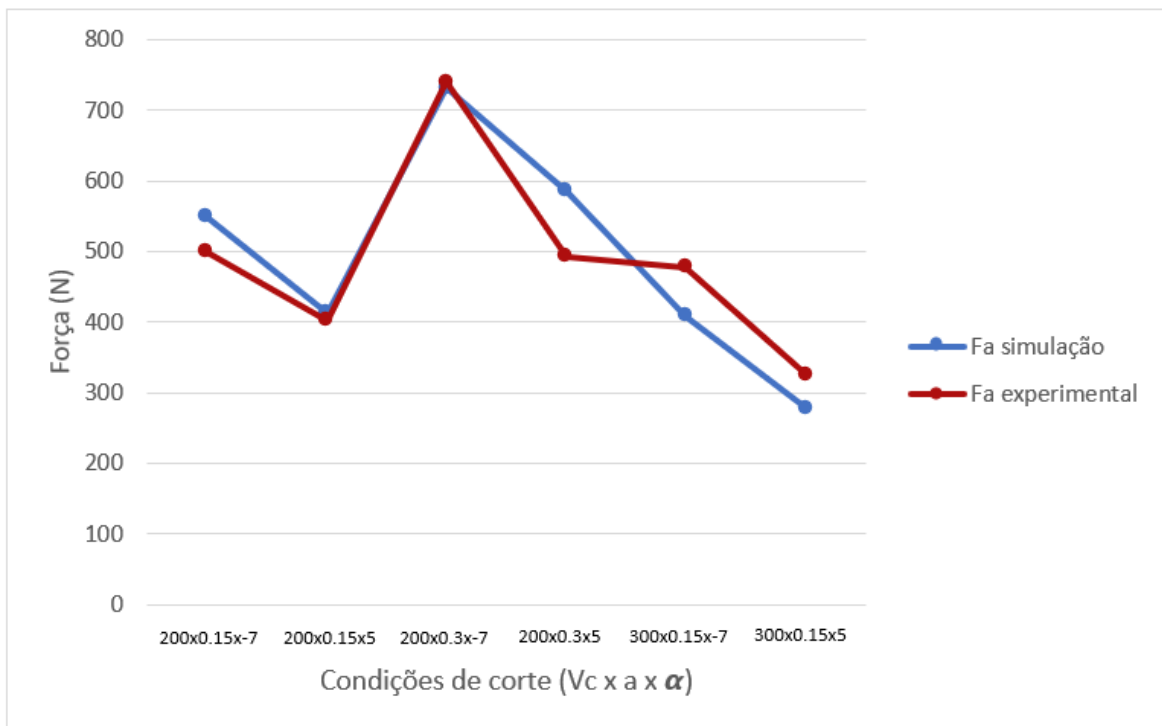


Figura 30 - Comparação entre a força de avanço obtida nas simulações e obtida experimentalmente por Ning e Liang (2018).

Tendo em conta os resultados das simulações, se fosse necessário optar apenas por uma ferramenta, ter-se-ia optado pela ferramenta com um ângulo de 5°, pois é a ferramenta que apresenta forças de corte e de avanço mais reduzidas quando todas as outras condições de maquinagem se mantêm. Além disso, o efeito é o mesmo tanto na temperatura como na potência de corte, para um ângulo de 5° a temperatura e potência de corte são mais reduzidas.

Na transição da velocidade de 200 m/min para 300 m/min, é visível que tanto a força de corte como a força de avanço diminuem, para o mesmo avanço da ferramenta e independentemente do ângulo de saída da ferramenta, podendo estar relacionado com o aumento da temperatura provocado pelo aumento da velocidade. De forma contrária, verificou-se que quanto maior for o avanço da ferramenta maior serão as forças de corte e de avanço, para a mesma velocidade de corte e ângulo de saída da ferramenta, uma vez que estamos a aumentar a secção da avara.

Analogamente ao ângulo de saída, o ângulo de ataque tem também um papel muito influente nomeadamente na força de avanço. Verificou-se que para um ângulo de ataque de -7° a força de avanço é consideravelmente superior em comparação com o ângulo de 5°. O mesmo efeito acontece para a força de corte, apesar de a diferença ser bastante inferior comparativamente à diferença da força de avanço.

Os desvios dos resultados da simulação face aos experimentais representam o erro do software em relação ao processo experimental. É imperativo antever que as análises realizadas no software não correspondem à realidade, apesar de ser uma ferramenta muito vantajosa para prever o comportamento do material. Ou seja, é importante ter em conta um intervalo de valores para o qual o erro atingido é aceitável e minimamente influenciável nos resultados quando se compara com a literatura. Esse valor foi estipulado para 40%, correspondente ao erro acumulado entre a força de corte e a força de avanço, como está descrito na Tabela 11.

Relativamente às temperaturas de corte obtidas nas simulações e no processo experimental, os valores estão representados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados das temperaturas de corte obtidos nas simulações e obtidos experimentalmente por Ning e Liang (2018).

Teste	Ângulo de ataque [°]	Temp ^e [N]	Temp ^s [N]	Erro Temp (%)
1	-7	760.53	686.493	9.74
2	5	713.5	763.959	7.07
3	-7	857.46	812.867	5.2
4	5	792.05	775.192	2.13
5	-7	798.38	967.67	21.2
6	5	745.21	923.451	23.92

É visível uma não concordância entre os resultados experimentais de Ning e Liang (2018) e os resultados obtidos nas simulações. Para os primeiros dois testes, enquanto que experimentalmente o valor da temperatura de corte para um ângulo de ataque de -7° é superior comparativamente à temperatura de corte para um ângulo de 5° , nas simulações a temperatura comporta-se da forma oposta. Nas restantes simulações verifica-se o que Ning e Liang (2018) obtiveram experimentalmente. Os valores da temperatura de corte média estão representados na Figura 31, bem como os resultados obtidos experimentalmente por Ning e Liang (2018).

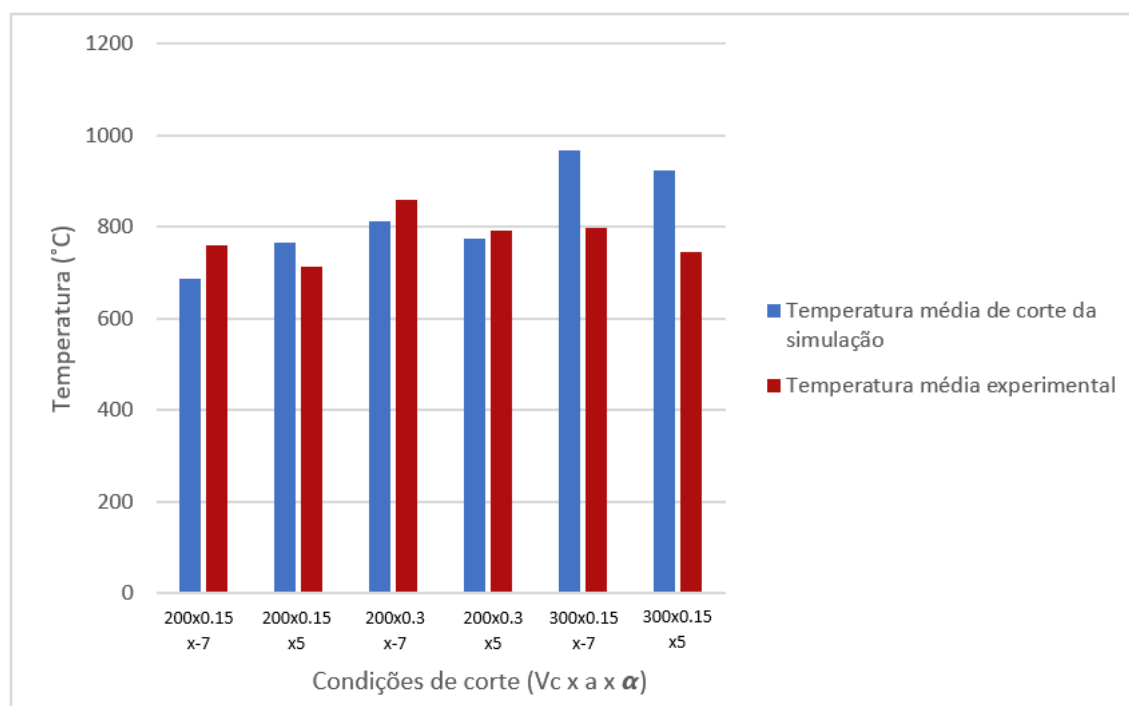


Figura 31 - Temperatura de corte média da simulação e temperatura de corte obtida experimentalmente por Ning e Liang (2018).

É visível que as maiores temperaturas de corte médias medidas através da simulação acontecem para a maior velocidade de corte (300 m/min). Verifica-se também um ligeiro aumento da temperatura média de corte das simulações face aos resultados experimentais nos dois últimos testes, onde a velocidade de corte toma o maior valor.

Em relação à potência de corte, os valores conseguidos nas simulações estão representados na Figura 32.

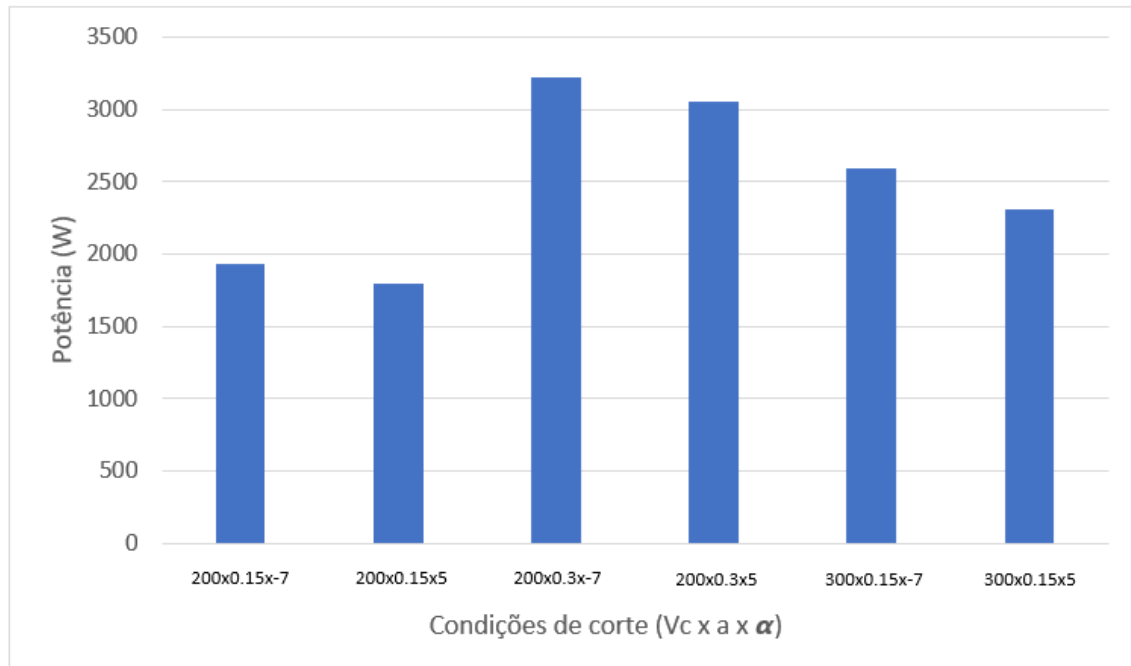


Figura 32 - Potência de corte dos vários processos de corte.

No caso da potência de corte, é perceptível que esta variável é mais afetada pela profundidade de corte do que pela velocidade de corte. A potência de corte atinge os seus valores máximos para uma profundidade de corte de 0.3 mm, no entanto o aumento da velocidade de corte faz também aumentar o valor desta potência.

O procedimento para a obtenção do grau de recalque e a deformação angular é precisamente o mesmo que foi utilizado para todos os casos, explícito no capítulo 3. Os seus valores estão representados na Figura 33 e na Figura 34.

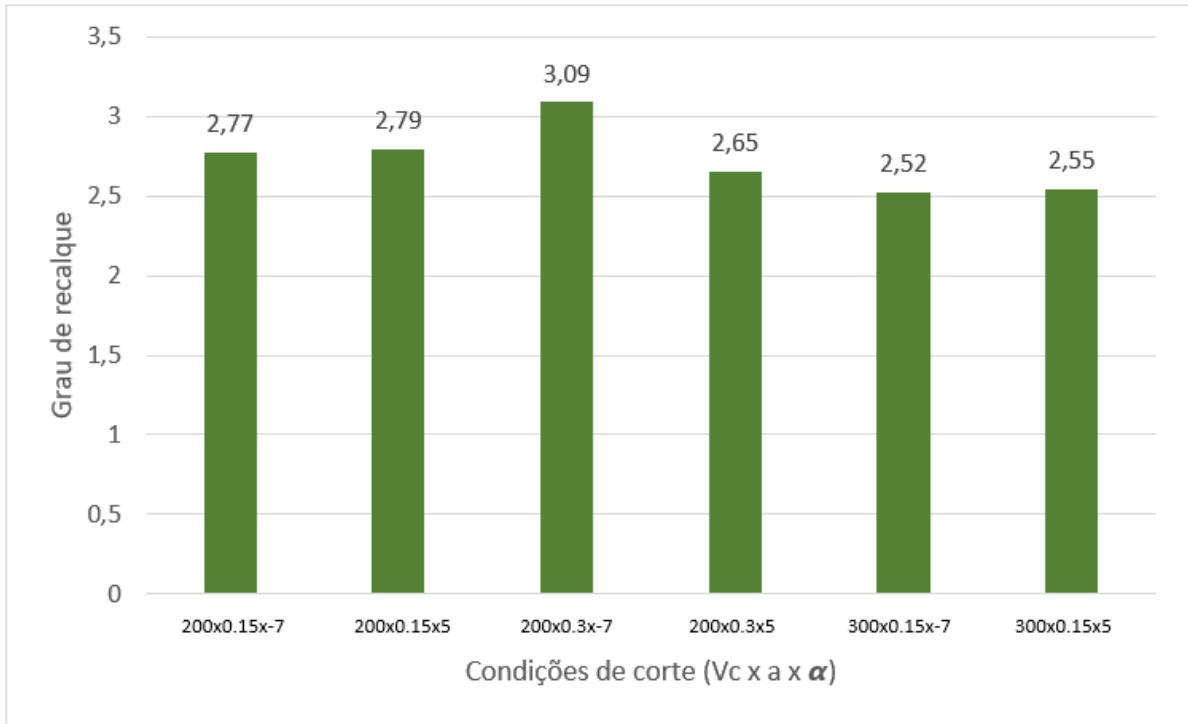


Figura 33 - Grau de recalque para as várias condições de corte.

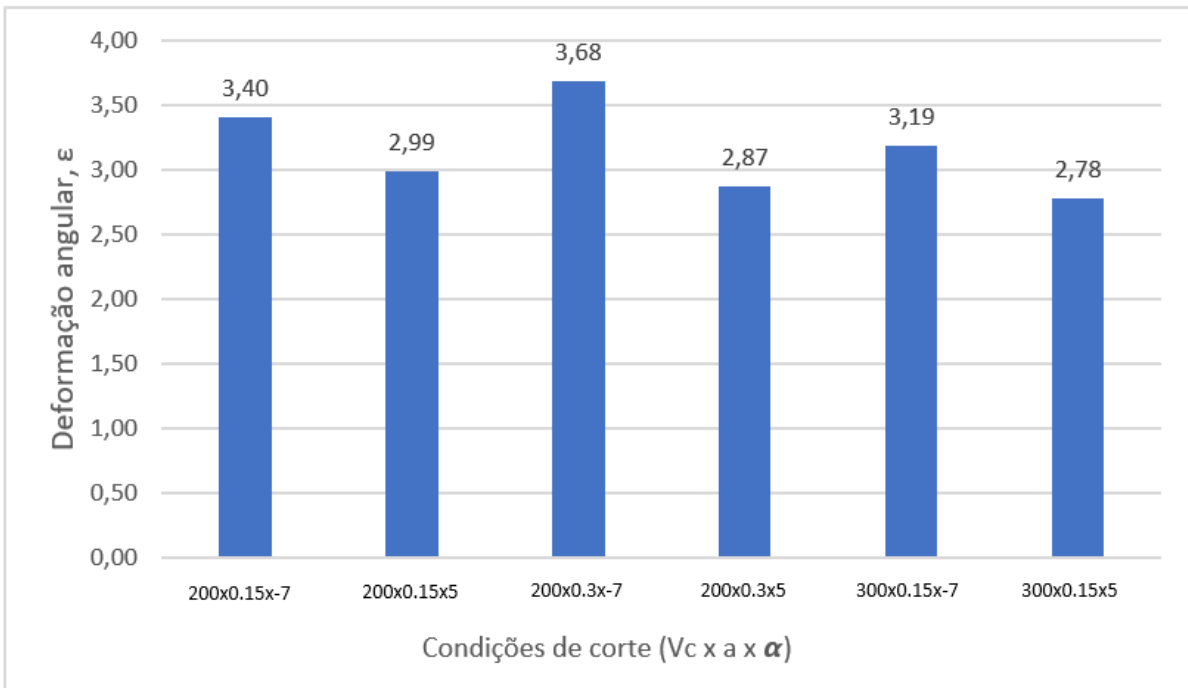


Figura 34 - Deformação angular para as várias condições de corte.

O maior valor do grau de recalque acontece para o maior avanço testado e para um ângulo de ataque da ferramenta de corte de -7° .

Tendo em conta a equação (6), é previsível que os valores mais elevados da deformação angular ocorram para um ângulo de corte menor. É precisamente isso que acontece pela análise de cada processo de corte, ou seja, os valores da deformação angular mais elevados ocorrem para um ângulo de corte de -7° . É visível ainda que o maior valor da deformação angular acontece para um ângulo de ataque negativo combinado com o avanço da ferramenta mais elevado. Este facto é resultado do fator multiplicativo do grau de recalque do processo.

4.2. Aço AISI D2

O segundo grupo de simulações numéricas FEM foi feito para o aço AISI D2. Arsecularatne *et al.* (2006) realizaram um trabalho experimental de corte ortogonal de um material de difícil maquinabilidade, o aço AISI D2 de dureza 62 HRC com ferramentas PCBN. O estudo incide-se essencialmente na análise da vida útil da ferramenta utilizada em função da quantidade de remoção de material nos vários ciclos de utilização. Adicionalmente, são especificadas as forças de corte atingidas no processo.

Na Tabela 13 são referidos os parâmetros experimentais usados por Arsecularatne *et al.* (2006) bem como os dados introduzidos no software FEM.

Tabela 13 - Parâmetros de entrada do software FEM e dados experimentais utilizados nas simulações do aço AISI D2.

	Parâmetros	FEM	Arsecularatne <i>et al.</i> (2006)
Peça	Comprimento [L]	5 mm	-
	Altura [h]	3 mm	-
	Material	AISI D2 – modelo de Johnson Cook	AISI D2
Ferramenta	Ângulo de ataque [α]	5°	5°
	Comprimento da face de ataque [q]	2 mm	-
	Ângulo de saída [b]	7°	7°
	Comprimento da face de saída [p]	2 mm	-
	Raio de gume [r]	0.02 mm	-
	Material	CBN	PCBN

Processo	Profundidade de corte [doc]	0.5 mm	0.5 mm
	Comprimento de corte [loc]	5 mm	-
	Avanço [f]	0.08; 0.14; 0.2 mm	0.08; 0.14; 0.2 mm
	Velocidade de corte [V]	70; 95; 120 m/min	70; 95; 120 m/min
	Coefficiente de atrito [μ]	Variável	Não especificado
	Fluido de corte	seco	seco
Simulação	Número máximo de nós	72000	-
	Máximo tamanho do elemento	0.1 mm	-
	Mínimo tamanho do elemento	0.02 mm	-
	Análise de tensões residuais	Ativo	-

Foram utilizados valores para o coeficiente de atrito entre 0.5 e 0.55 para avanços de 0.08 mm/rot, entre 0.6 e 0.65 para avanços de 0.14 mm/rot e entre 0.6 a 0.7 para avanços de 0.2 mm/rot. Estes valores foram consultados na literatura e assumidos para os testes com os mesmos parâmetros de corte (Arsecularatne *et al.*, 2006).

Relativamente ao modelo do material utilizado na simulação, os valores das variáveis termomecânicas e das variáveis da equação (7) de *Johnson-Cook* consultados na literatura e utilizados nas simulações de corte ortogonal deste aço estão presentes na Tabela 14.

Tabela 14 - Valores das variáveis que interferem com o modelo de Johnson-Cook (Tang, Huang and Xie, 2011).

	Parâmetros	Valor
Térmicos	Condutividade térmica [W/m · °C]	21
	Calor específico [J/Kg · °C]	485
Mecânicas	Módulo de Young [Pa]	180E9
	Coefficiente de Poisson	0.3
	Densidade [Kg/m³]	7750

Equação de Johnson-Cook	A [Pa]	1766E6
	B [Pa]	904E6
	c	0.012
	m	3.38
	n	0.312
	T_{melt} (°C)	1459.85
	T_{room} (°C)	20

Na Figura 35 está apresentada a análise gráfica das forças de corte e de avanço em função do avanço da ferramenta, para cada velocidade de corte.

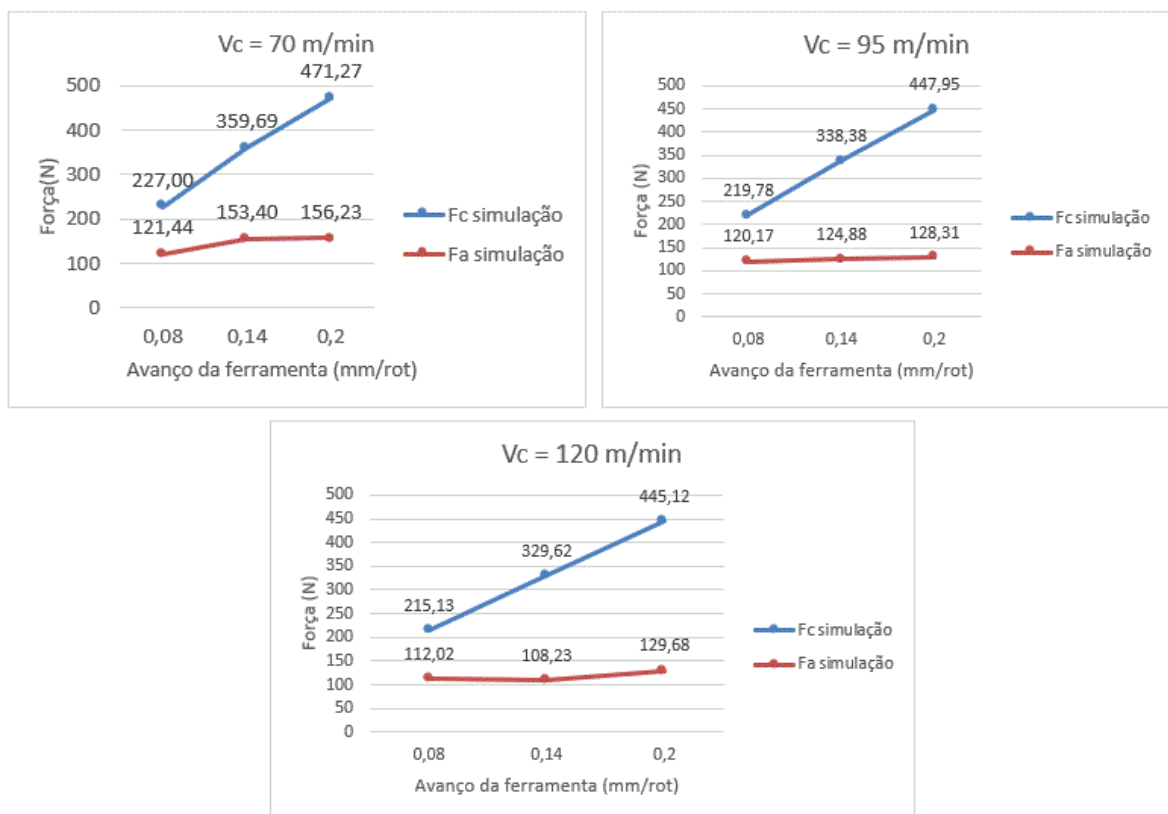


Figura 35 - Forças de corte e de avanço em função do avanço da ferramenta, para cada velocidade de corte.

Para os testes de Arsecularatne *et al.* (2006), verifica-se que o avanço da ferramenta tem um papel muito influente no comportamento da força de corte do processo. À medida que se aumenta o

avanço, a força de corte aumenta significativamente. Já a força de avanço não é tão afetada pelo avanço da ferramenta como a força de corte, permanecendo os seus valores sensivelmente no mesmo patamar. Já a velocidade de corte não apresenta uma influência significativa nos valores das forças de corte e de avanço.

Nas Figura 36 e Figura 37 está representada a diferença das forças de corte e de avanço dos resultados da simulação e dos resultados experimentais, em função do avanço da ferramenta para as diferentes velocidades de corte.

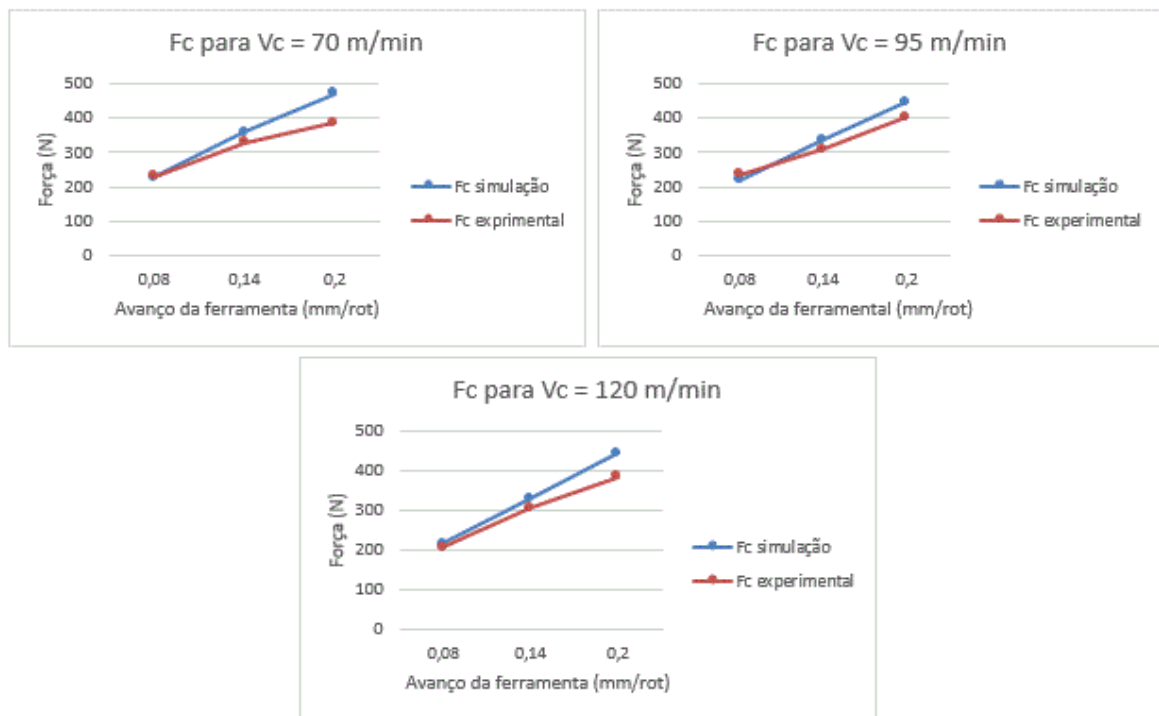


Figura 36 - Valores experimentais de Arsecularatne *et al.* (2006) e valores simulados das forças de corte em função do avanço da ferramenta, para as diferentes velocidades de corte.

Em relação à força de corte, tanto a força obtida pela simulação como a obtida experimentalmente por Arsecularatne *et al.* (2006) manifestam comportamentos bastante semelhantes para qualquer velocidade de corte.

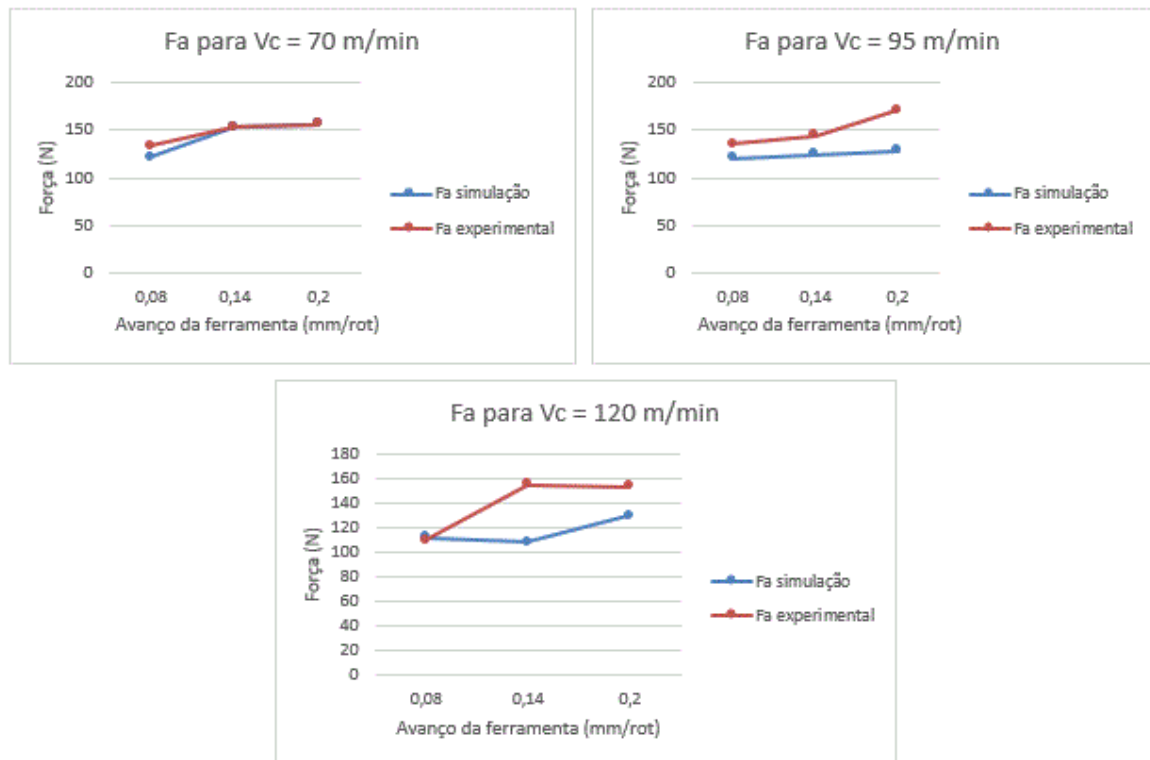


Figura 37 - Valores experimentais de Arsecularatne *et al.* (2006) e valores simulados das forças de avanço em função do avanço da ferramenta, para as diferentes velocidades de corte.

A força de avanço apresenta, também um comportamento semelhante quando se compara com os resultados experimentais de Arsecularatne *et al.* (2006), à exceção das simulações para uma velocidade de corte de 120 m/min.

No que diz respeito à potência e temperatura de corte, os gráficos que representam o comportamento de ambas as variáveis para os diferentes avanços da ferramenta e velocidades de corte estão representados na Figura 38 e na Figura 39, respectivamente. Como a profundidade de corte assume um único valor, é mais simples retirar conclusões acerca da influência dos restantes parâmetros de corte.

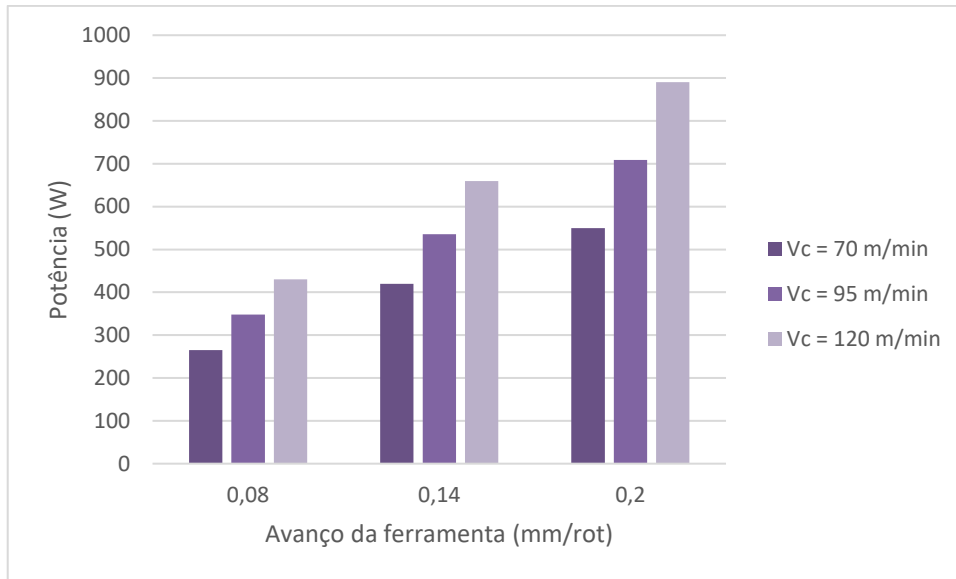


Figura 38 – Valores numéricos da potência em função do avanço da ferramenta para as diferentes velocidades de corte.

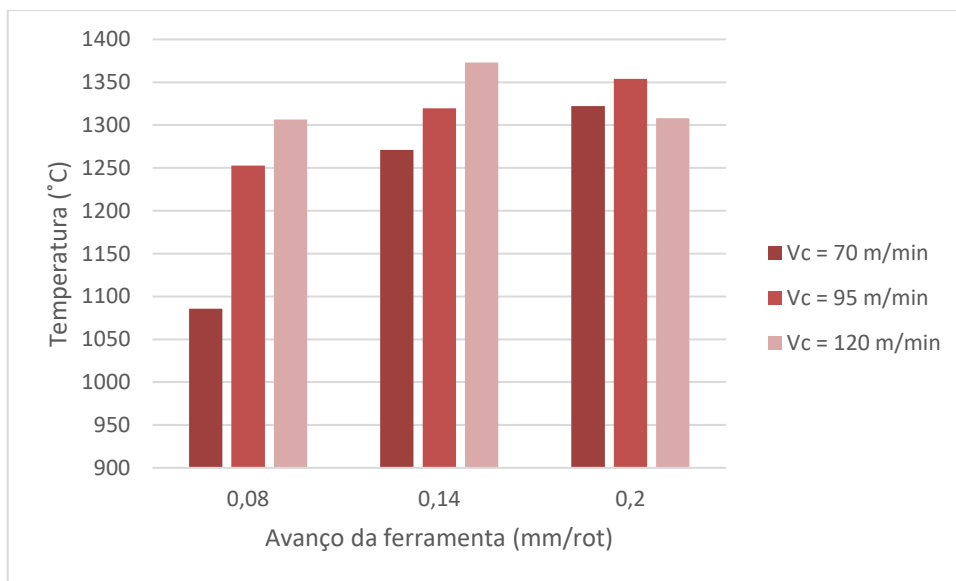


Figura 39 – Valores numéricos da temperatura em função do avanço da ferramenta para as diferentes velocidades de corte.

Pela análise gráfica, é visível que o avanço da ferramenta e a velocidade de corte são parâmetros que influenciam bastante a potência do corte. É perceptível que quanto maior forem os valores da velocidade de corte e do avanço da ferramenta, maior será a potência de corte atingida, facto que valida a utilização da equação (3) para o cálculo da potência de corte presente no capítulo 2.

No que diz respeito à temperatura de corte, os valores oscilam entre os 1250 °C e os 1360 °C, à exceção da simulação para um avanço de 0.08 mm/rot e velocidade de corte de 70 m/min, cujo valor ronda os 1080 °C. Nota-se um aumento progressivo da temperatura de corte à medida que a velocidade de corte aumenta, à exceção do último resultado para uma velocidade de corte de 120 m/min. Na Figura 40 está representada a distribuição da temperatura na ferramenta, peça e apra para as simulações com um avanço de 0.2 mm/rot.

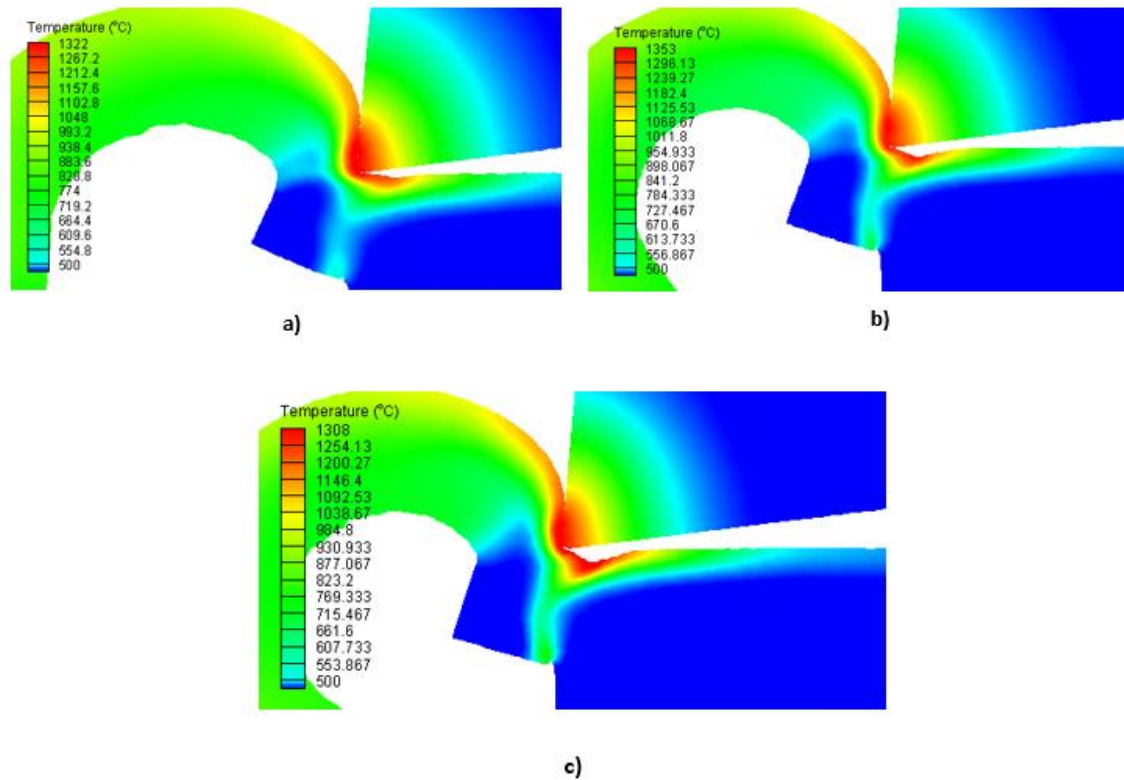


Figura 40 - Distribuição da temperatura na ferramenta, peça e apra para as simulações com um avanço de 0.2 mm/rot e a) Vc = 70 m/min, b) Vc = 95 m/min e c) Vc = 120 m/min.

Por fim, o grau de recalque foi calculado como mencionado no capítulo 3, recorrendo à equação (5). Os resultados estão representados na Figura 41.

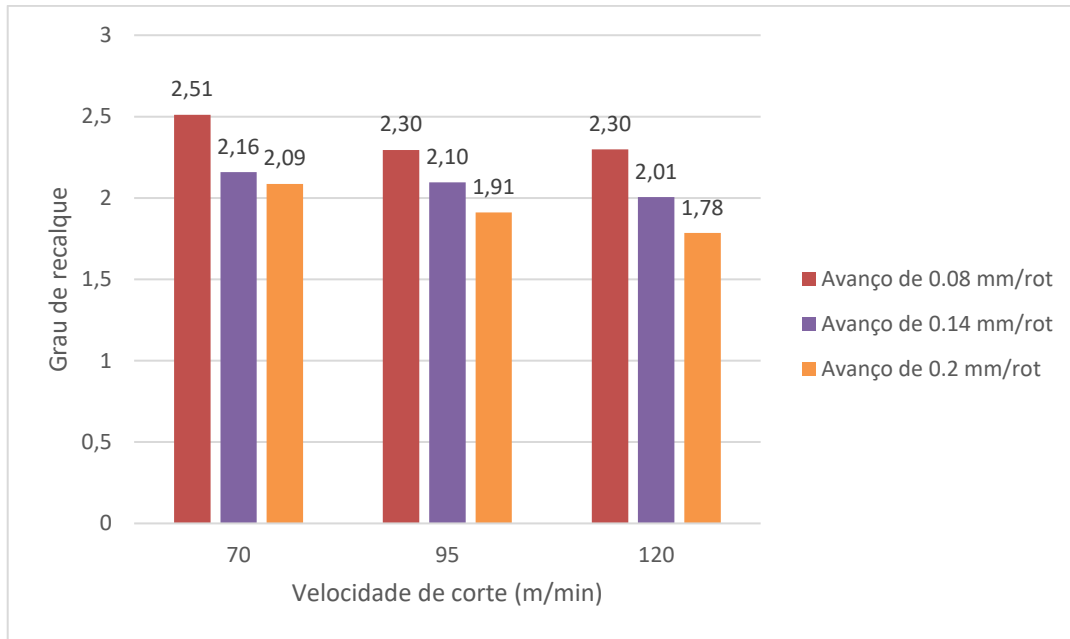


Figura 41 - Grau de recalque em função da velocidade de corte para os diferentes avanços da ferramenta.

Os valores mais elevados do grau de recalque ocorrem para o menor avanço da ferramenta. Este parâmetro de corte é o que mais influência apresenta no grau de recalque do processo. Verificou-se que quanto maior for o avanço, menor é o grau de recalque com uma diferença bastante notória de avanço para avanço. O efeito da velocidade de corte neste valor é pouco significativo, apesar de haver uma ligeira diminuição do grau de recalque quando se aumenta a velocidade de corte.

Conhecendo o grau de recalque do processo, e recorrendo à equação (6) torna-se simples conhecer os valores da deformação angular associada ao processo de corte. Os seus valores estão ilustrados na Figura 42. Verifica-se uma diminuição com o aumento do avanço da ferramenta.

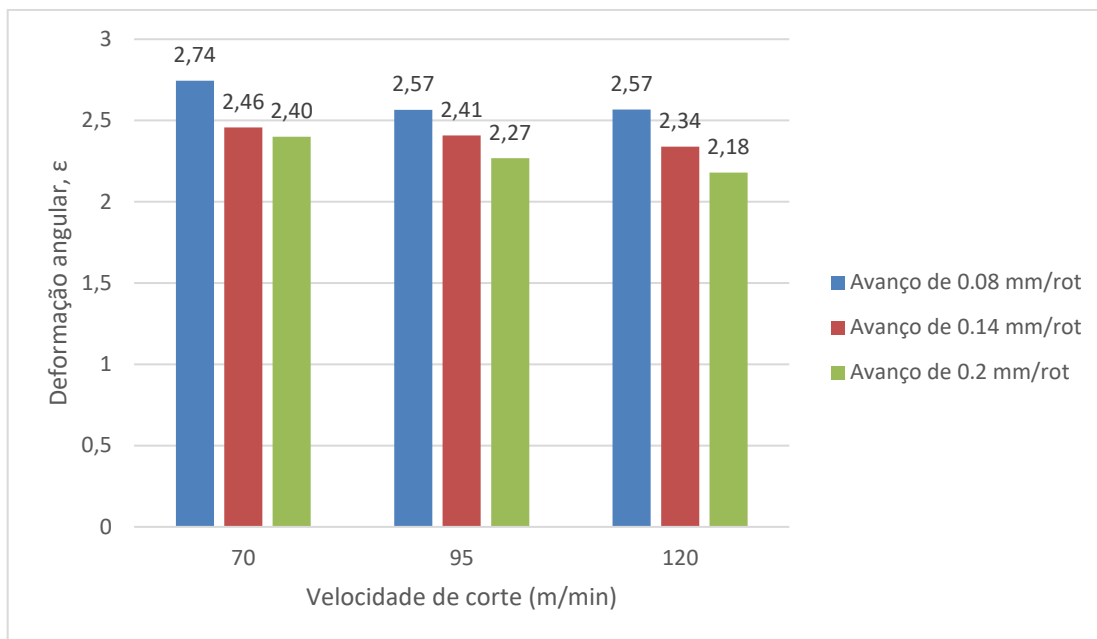


Figura 42 - Deformação angular em função da velocidade de corte para os diferentes avanços da ferramenta.

4.3. Aço AISI H13

O terceiro grupo de simulações numéricas FEM foi feito para o aço AISI H13. Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012) realizaram um estudo sobre o efeito dos parâmetros de corte nas forças de corte e no desgaste da ferramenta num processo de torneamento do aço AISI H13. Os resultados experimentais revelam que a velocidade de corte e a profundidade de corte são os parâmetros com maior influência na magnitude das forças de avanço. Por outro lado, o avanço da ferramenta e a profundidade de corte provaram influenciar significativamente a magnitude das forças de corte. A profundidade de corte e a velocidade de corte apresentam efeito predominante no desgaste da ferramenta, enquanto que o avanço da ferramenta pouco influencia esta variável. No que toca à análise de forças de corte e de avanço, estes três parâmetros afetam diretamente os seus valores.

Kumar and Chauhan (2015) estudaram a maquinabilidade no torneamento de acabamento de superfície do aço AISI H13 com uma ferramenta CBN. Este estudo analisa diferentes parâmetros experimentais, incluindo dureza da peça, influência do avanço, velocidade de corte e profundidade de corte nas forças de corte, rugosidade da superfície e temperatura da ponta da ferramenta. O estudo revelou que a dureza da peça é a variável que mais influência apresenta em todas as respostas. Foi observado que a força de avanço foi 1.34-2.04 vezes superior à força tangencial. A profundidade de corte e a dureza da peça são os parâmetros mais influentes nas forças do processo, ou seja, quanto maior a dureza da peça, avanço da ferramenta e profundidade de corte, maior serão as forças de corte e de avanço, embora a velocidade de corte apresente efeitos menos significativos. Dureza da peça, avanço da ferramenta e velocidade de corte afetam diretamente a temperatura atingida na interface de contacto entre a ferramenta e a peça, enquanto que a profundidade de corte tem um efeito menos relevante. As condições que apresentaram os

melhores resultados em termos de rugosidade da superfície, forças de corte e temperatura na interface peça-ferramenta foram os valores de força de corte de 149.9 m/min, profundidade de corte de 0.05 mm, avanço da ferramenta de 0.06 mm/rot e dureza de 45 HRC.

Na Tabela 15 são referidos os parâmetros experimentais usados por Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012) e por Kumar e Chauhan (2015), apenas para fins comparativos com os dados de entrada utilizados no software FEM, também apresentados.

Tabela 15 - Parâmetros de entrada do software FEM e dados experimentais utilizados nas simulações do aço AISI H13.

	Parâmetros	FEM	Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012)	Kumar e Chauhan (2015)
Peça	Comprimento [L]	5 mm	-	15 mm
	Altura [h]	3 mm	-	25 mm
	Material	AISI H13 – modelo de Johnson Cook	AISI H13	AISI H13
Ferramenta	Ângulo de ataque [α]	6 °	- 6 °	7 °
	Comprimento da face de ataque [q]	2 mm	2 mm	-
	Ângulo de saída [b]	6 °	6 °	-
	Comprimento da face de saída [p]	2 mm	2 mm	-
	Raio de gume [r]	0.02 mm	-	-
	Material	Carboneto grau P	Cerâmica grau KY1615	CBN
	Revestimento	TiC e Al ₂ O ₃ (0.015 mm de espessura)	TiC e Al ₂ O ₃ (0.015 mm de espessura)	-
Processo	Profundidade de corte [doc]	0.2; 0.4; 0.6 mm	0.2; 0.4; 0.6 mm	0.05; 0.09; 0.13 mm
	Comprimento de corte [loc]	5 mm	-	15 mm
	Avanço [f]	0.1; 0.14; 0.18 mm	0.1; 0.14; 0.18 mm	0.05; 0.1; 0.15 mm/rot
	Velocidade de corte [V]	140; 200 m/min	140; 200 m/min	100; 125; 150 m/min
	Coefficiente de atrito [μ]	Variável	Não especificado	Não especificado
	Fluido de corte	seco	seco	Seco

Simulação	Número máximo de nós	24000	-	-
	Máximo tamanho do elemento	0.1 mm	-	-
	Mínimo tamanho do elemento	0.02 mm	-	-
	Análise de tensões residuais	Ativo	-	-

Tal como se procedeu para o aço AISI D2, o método de seleção do material da peça foi o mesmo, recorrendo ao modelo de Johnson-Cook. Os valores das variáveis requerentes deste modelo estão especificados na Tabela 16.

Tabela 16 - Valores das variáveis que interferem com o modelo de Johnson-Cook (Huang e Liang, 2003).

	Parâmetros [Unidades]	Valor
Térmicos	Condutividade térmica [W/m · °C]	37
	Calor específico [J/Kg · °C]	560
Mecânicas	Módulo de Young [Pa]	211E9
	Coefficiente de Poisson	0.28
	Densidade [Kg/m ³]	7800
Equação de Johnson-Cook	A [Pa]	674.8E6
	B [Pa]	239.2E6
	c	0.027
	m	1.3
	n	0.28
	T _{melt} (°C)	1486.85
	T _{room} (°C)	20

Os resultados obtidos nas simulações foram obtidos unicamente para análise do comportamento do material quando é maquinado.

Partindo para a análise do comportamento das forças para os diferentes parâmetros de maquinagem, as Figuras 43, 44, 45 e 46 mostram os resultados numéricos e indicam a forma como as forças de corte e de avanço se comportam para os diferentes avanços da ferramenta, para cada velocidade de corte testada.

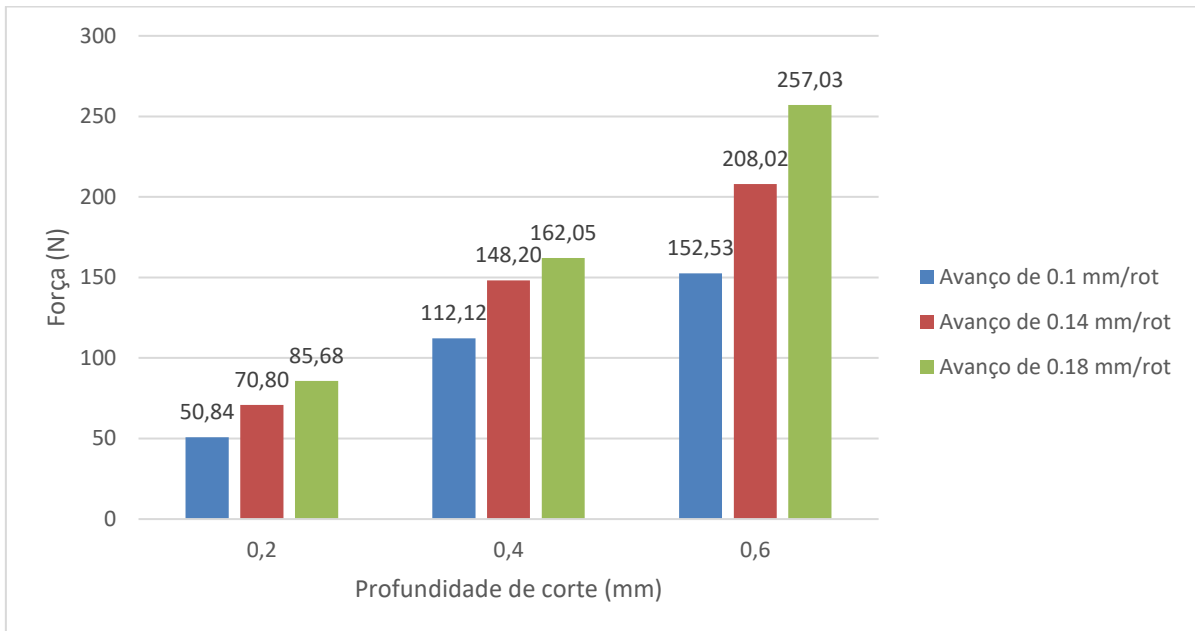


Figura 43 - Força de corte em função da profundidade de corte para os diferentes avanços da ferramenta e para uma velocidade de corte de 140 m/min.

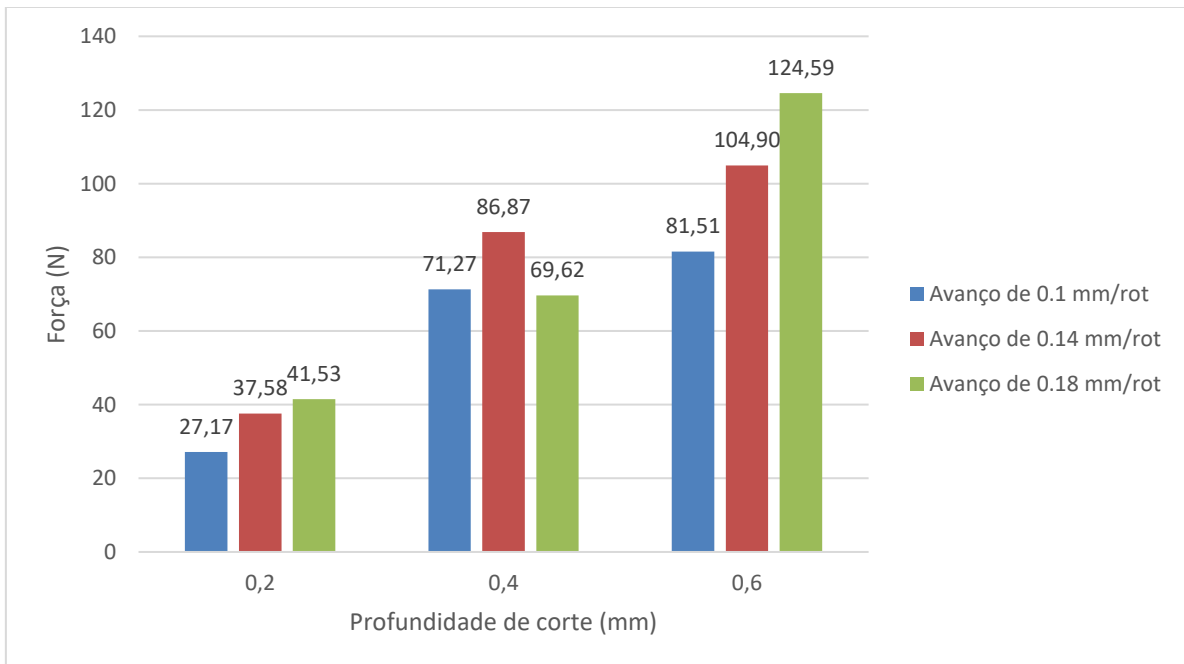


Figura 44 - Força de avanço em função da profundidade de corte para os diferentes avanços da ferramenta e para uma velocidade de corte de 140 m/min.

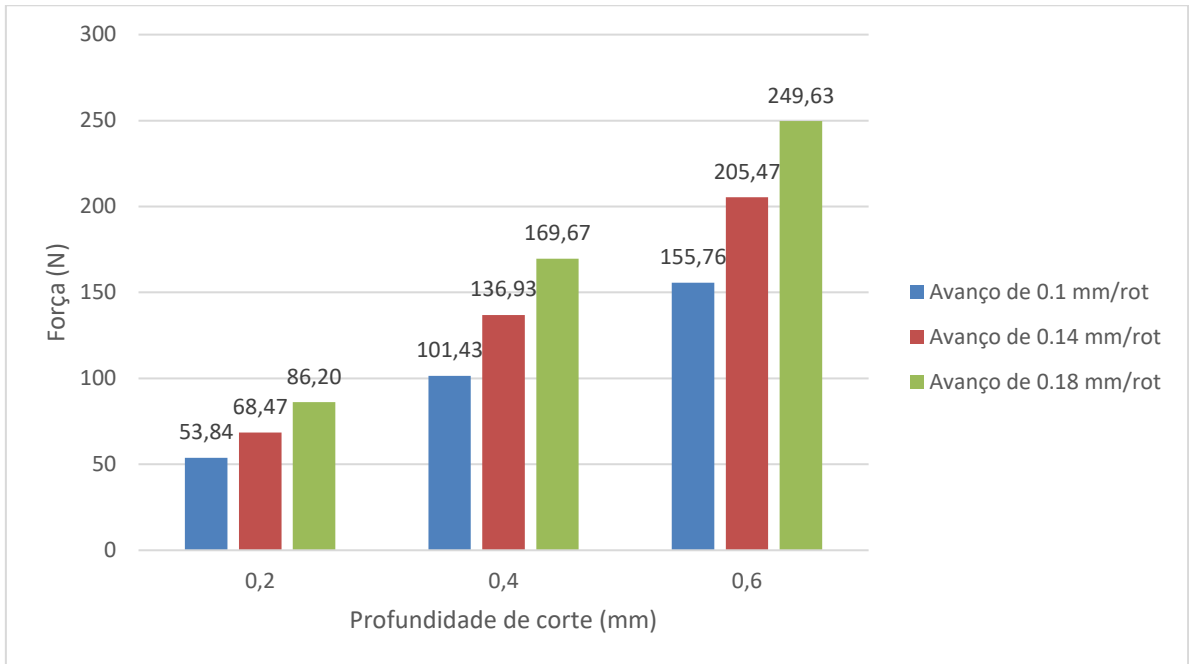


Figura 45 - Força de corte em função da profundidade de corte para os diferentes avanços da ferramenta e para uma velocidade de corte de 200 m/min.

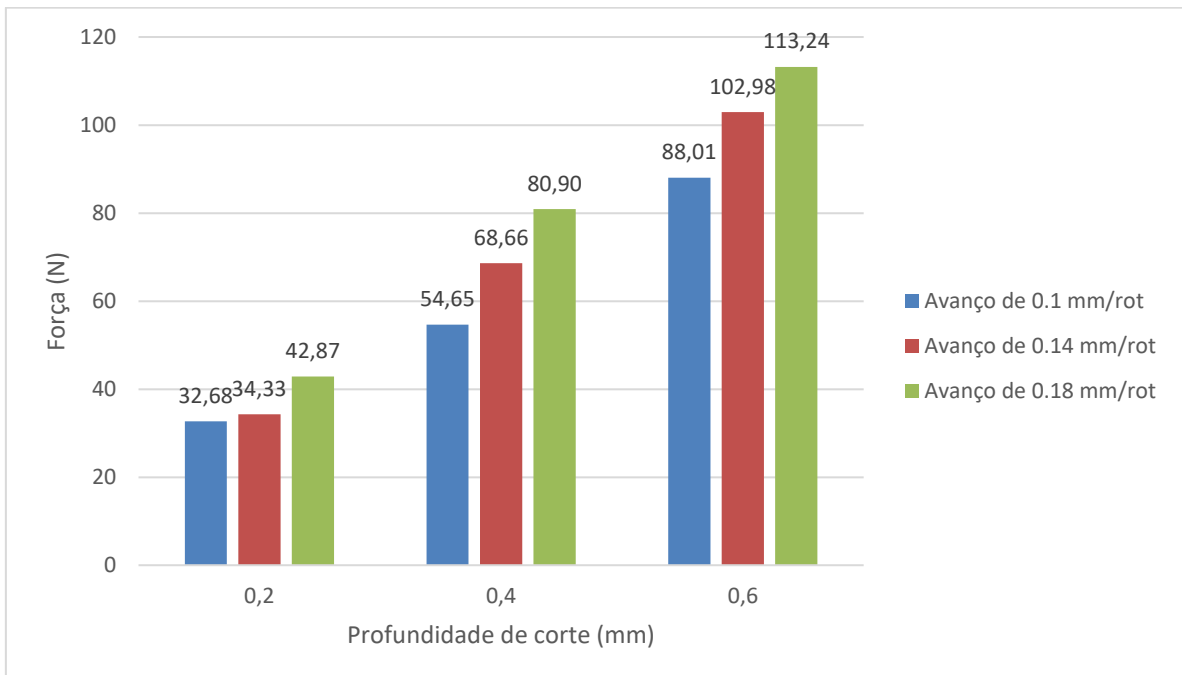


Figura 46 - Força de avanço em função da profundidade de corte para os diferentes avanços da ferramenta e para uma velocidade de corte de 200 m/min.

Pode verificar-se que tanto a força de corte como a força de avanço aumentam com o aumento da profundidade de corte, e quanto maior for o avanço da ferramenta maiores serão os valores destas forças também.

Ao contrário do que aconteceu para o aço AISI D2, os valores da força de avanço sofrem grande influência do avanço da ferramenta. Verificou-se ainda que, para uma profundidade de corte de 0.4 mm, avanço da ferramenta de 0.18 mm/rot e velocidade de corte de 140 m/min, o valor da força de avanço ficou relativamente abaixo do expectável, indo contra o que foi constatado anteriormente. Como as simulações foram realizadas com os mesmos parâmetros relativos ao refinamento da malha, ou seja, tamanho da malha e número de nós e a mesma ferramenta de corte, é possível que, para este teste em específico, estes parâmetros não sejam os ideais.

Em relação às velocidades de corte, não se verifica um aumento significativo nas forças de corte e de avanço. Os parâmetros de corte mais influentes na força de corte, à semelhança dos resultados obtidos para o aço AISI D2 são a profundidade de corte e o avanço da ferramenta.

No que diz respeito à potência e temperatura de corte e como foi procedido para as forças de corte, obtiveram-se resultados para as duas velocidades de corte separadamente.

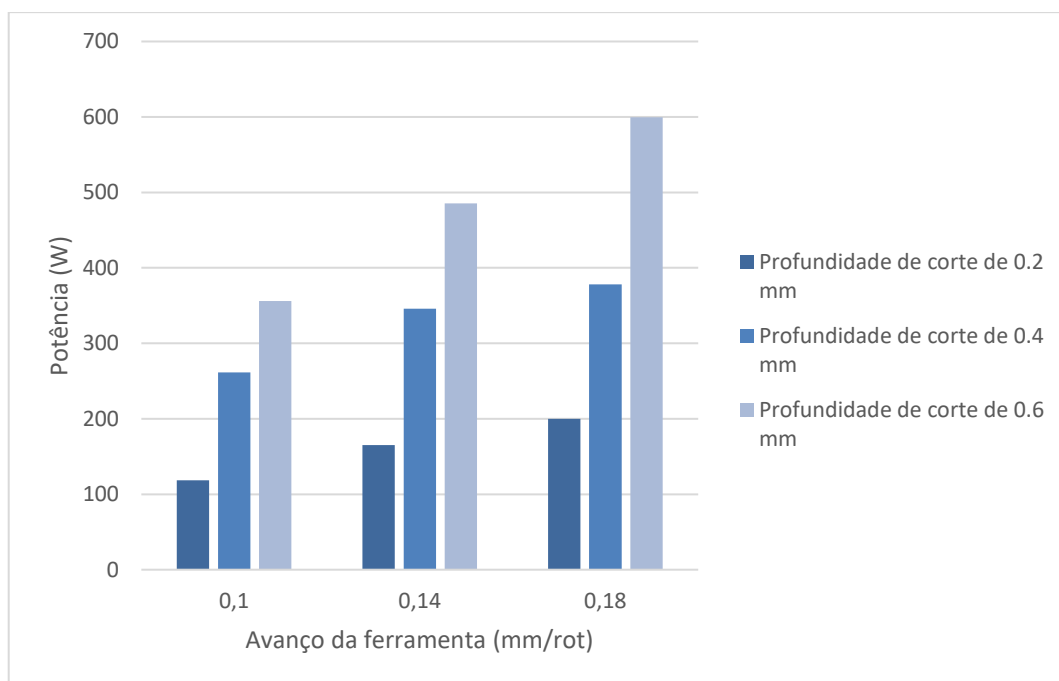


Figura 47 - Potência em função da profundidade de corte para os diferentes avanços e para uma velocidade de corte de 140 m/min.

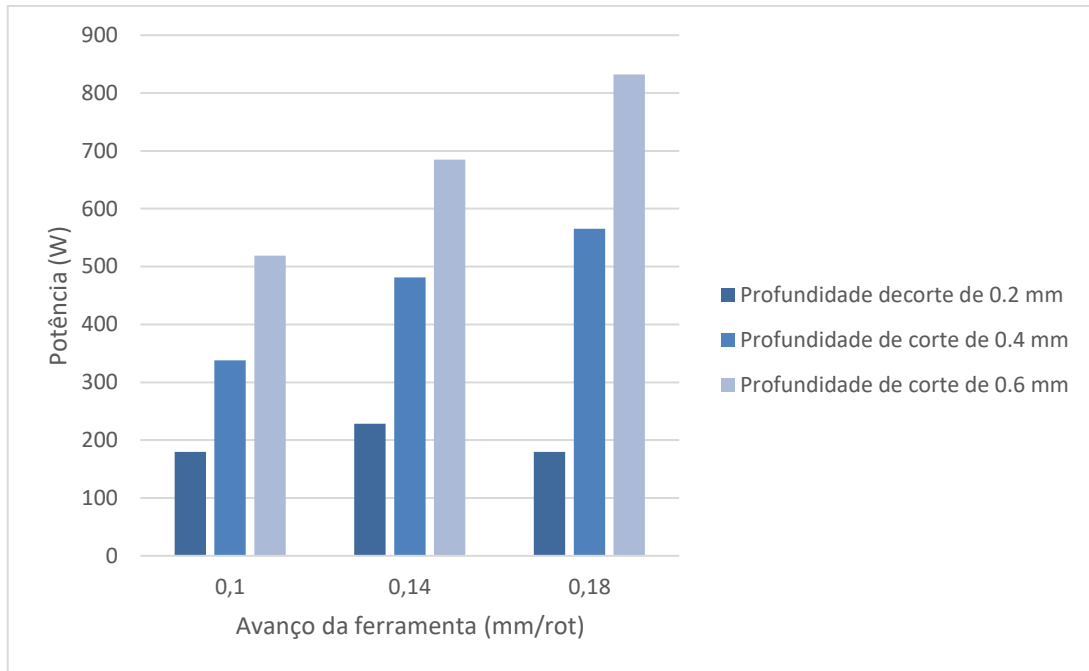


Figura 48 - Potência em função da profundidade de corte para os diferentes avanços e para uma velocidade de corte de 200 m/min.

A potência tem um comportamento semelhante ao caso do aço AISI D2. Para a mesma profundidade de corte, existe um aumento significativo do valor da potência à medida que o avanço da ferramenta aumenta. O aumento da velocidade de corte e da profundidade de corte também fazem com que o valor da potência de corte aumente consideravelmente.

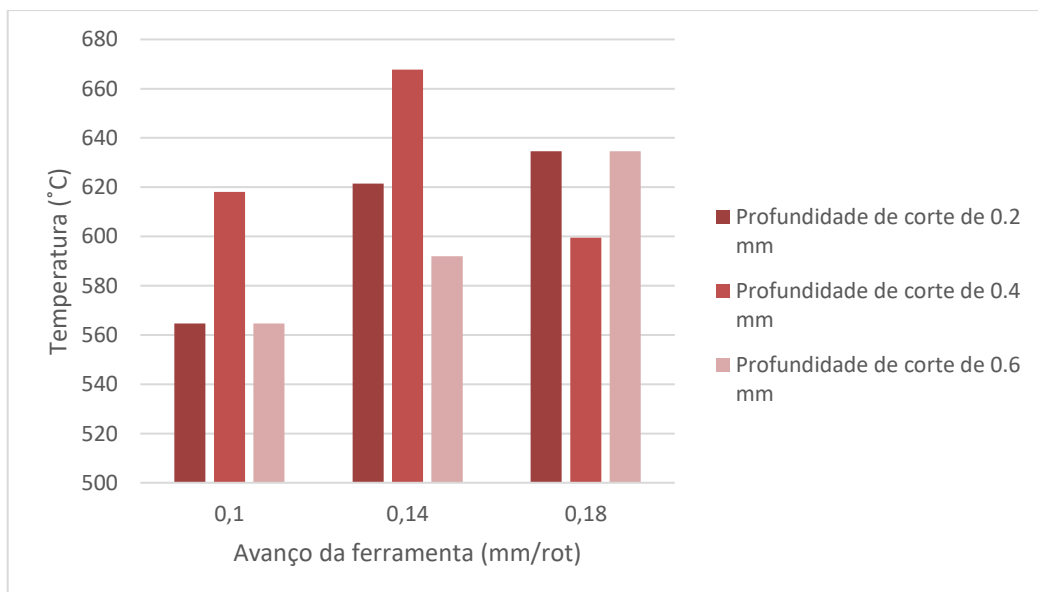


Figura 49 - Temperatura em função da profundidade de corte para os diferentes avanços e para uma velocidade de corte de 140 m/min.

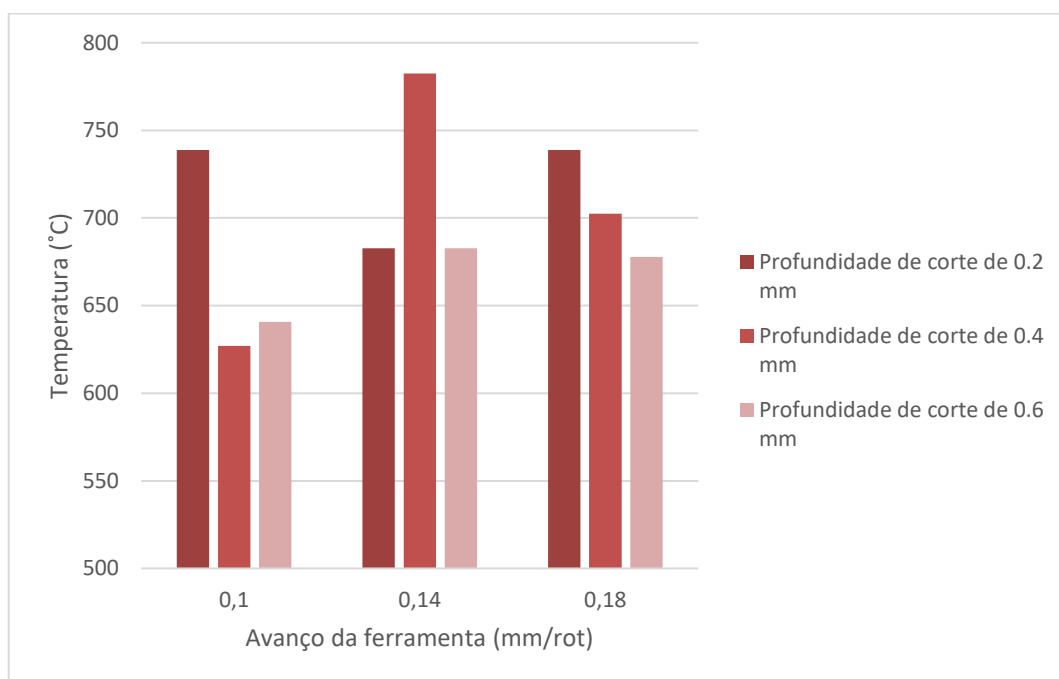


Figura 50 - Temperatura em função da profundidade de corte para os diferentes avanços e para uma velocidade de corte de 200 m/min.

À semelhança dos resultados obtidos para o aço AISI D2, o avanço da ferramenta tem influência na maioria dos resultados da temperatura de corte. À exceção de alguns casos, como é visível pela análise gráfica, verifica-se um aumento da temperatura com o aumento do avanço da ferramenta. Em relação à profundidade de corte, esta variável não apresenta uma relação visível nas temperaturas atingidas durante o corte.

Obtiveram-se consideravelmente mais resultados para o caso do aço AISI H13 em comparação com o aço AISI D2. Enquanto que no aço AISI D2 apenas foi testada uma profundidade de corte, no aço AISI H13 foram testadas três profundidades de corte diferentes, para cada um de três avanços e duas velocidades de corte diferentes. Nas Figura 51 e Figura 52 estão representados os valores do grau de recalque para cada combinação possível de parâmetros de corte.

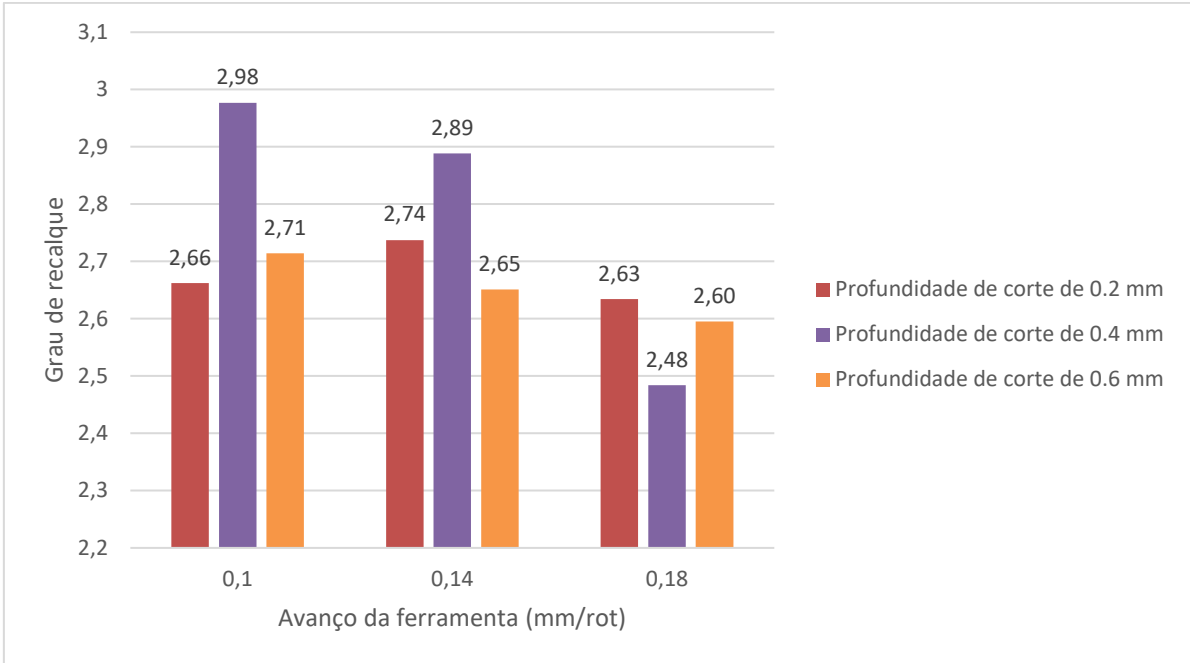


Figura 51 - Grau de recalque em função do avanço da ferramenta para as diferentes profundidades de corte e velocidade de corte de 140 m/min.

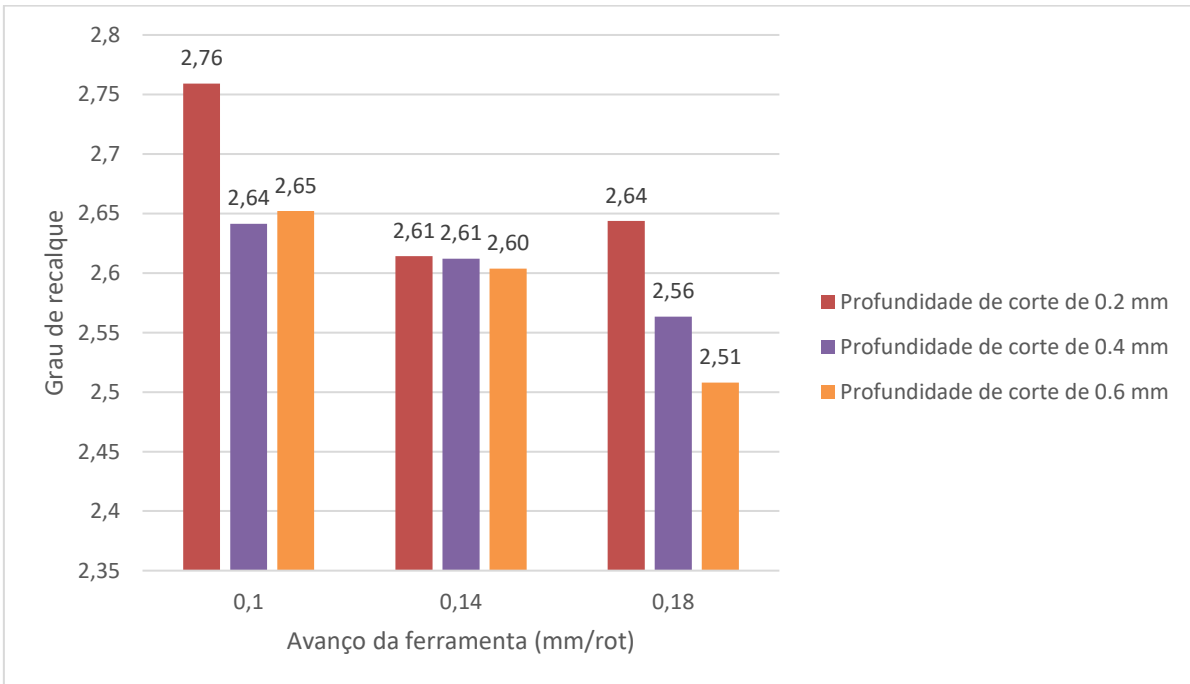


Figura 52 - Grau de recalque em função do avanço da ferramenta para as diferentes profundidades de corte e velocidade de corte de 200 m/min.

Pela análise dos gráficos e à semelhança das simulações para o aço AISI D2, é visível que o grau de recalque por norma diminui consideravelmente com o aumento do avanço da ferramenta, quando a análise é feita para a mesma profundidade de corte. Da mesma forma, quando se aumentou a

profundidade de corte, o valor do grau de recalque tendeu a diminuir para o mesmo avanço da ferramenta.

A partir do grau de recalque surge a deformação angular causada pela compressão/tração a que a peça fica sujeita durante a passagem da ferramenta. Os valores desta deformação estão representados nas Figura 53 e Figura 54.

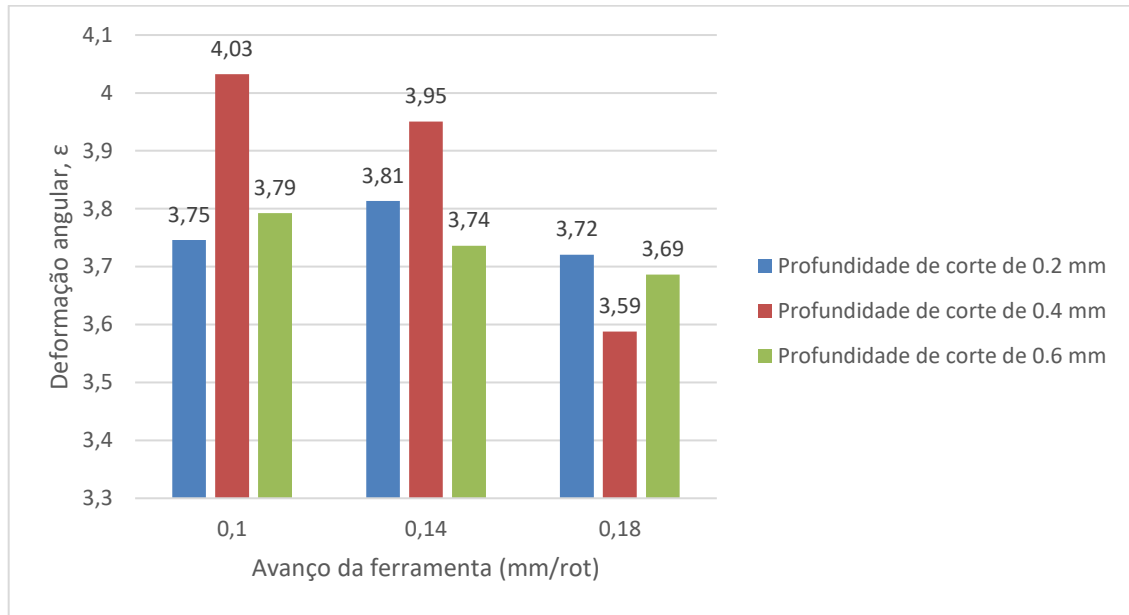


Figura 53 - Deformação angular em função do avanço da ferramenta para as diferentes profundidades de corte e velocidade de corte de 140 m/min.

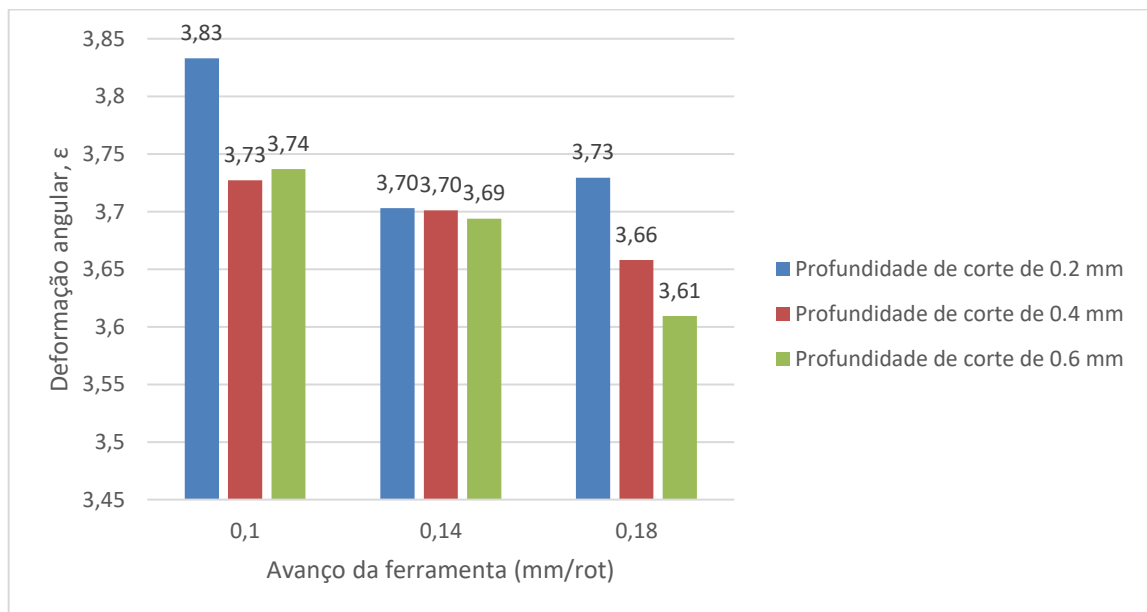


Figura 54 - Deformação angular em função do avanço da ferramenta para as diferentes profundidades de corte e velocidade de corte de 200 m/min.

4.4. Comparação da maquinabilidade dos materiais

Adicionalmente, foram efetuadas simulações com o objetivo de averiguar qual dos três aços apresenta uma melhor maquinabilidade no que diz respeito às forças de corte e de avanço, potência e temperatura média de corte. Achou-se ainda relevante incluir o grau de recalque e a deformação angular nesta comparação, para se ter uma melhor noção de qual material é mais suscetível a deformação durante o processo de corte com as mesmas condições. Na Tabela 17 estão representadas as condições de corte utilizadas nestas simulações.

Tabela 17 - Condições de corte utilizadas.

Condições de corte	Velocidade de corte [m/min]	Profundidade de corte [mm]	Avanço da ferramenta [mm/rot]	Ângulo de ataque [°]	Ângulo de saída [°]
1		0.2	0.1		
2	200	0.4	0.14	6	6
3		0.6	0.18		

Foram escolhidas estas condições de corte porque tanto a profundidade de corte como o avanço da ferramenta influenciam consideravelmente as variáveis que se pretende estudar e, por isso, foi apresentada uma gama destas condições de corte bastante distintas umas das outras.

Além disso, o facto de já terem sido realizadas simulações para estes parâmetros de corte para o aço AISI H13 facilitou a seleção dos parâmetros para comparar a maquinabilidade dos três materiais. Assim, foi apenas necessário realizar as simulações para os restantes materiais.

As Figura 55 e Figura 56 mostram os valores das forças de corte e de avanço para as condições de corte referidas.

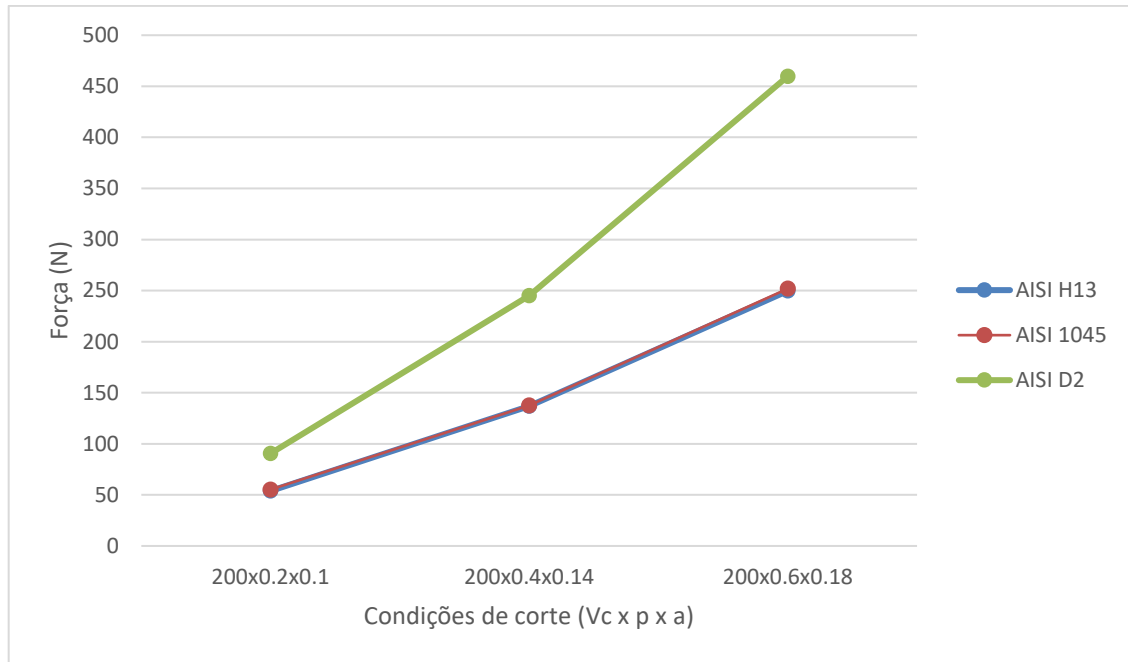


Figura 55 - Força de corte para os diferentes materiais maquinados e condições de corte.

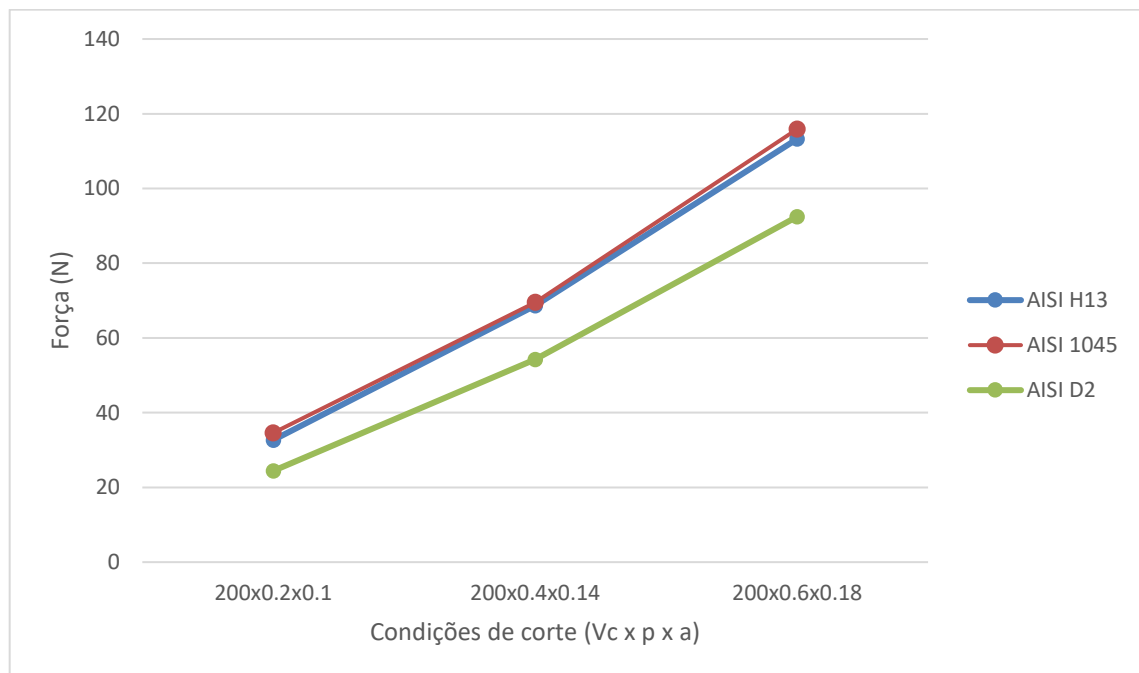


Figura 56 - Força de avanço para os diferentes materiais maquinados e condições de corte.

Pela análise gráfica, é visível que se atingem forças de corte superiores no aço AISI D2 e que tanto para o aço AISI 1045 como para o aço AISI H13, as forças de corte atingidas são sensivelmente as mesmas.

Da mesma forma, as forças de avanço para os aços AISI 1045 e AISI H13 estão muito próximas. No entanto e contrariamente às forças de corte, o aço AISI D2 apresenta valores para esta força sempre inferiores aos restantes aços.

Em relação à potência de corte, o Figura 57 ilustra os valores obtidos em cada simulação para os diferentes aços.

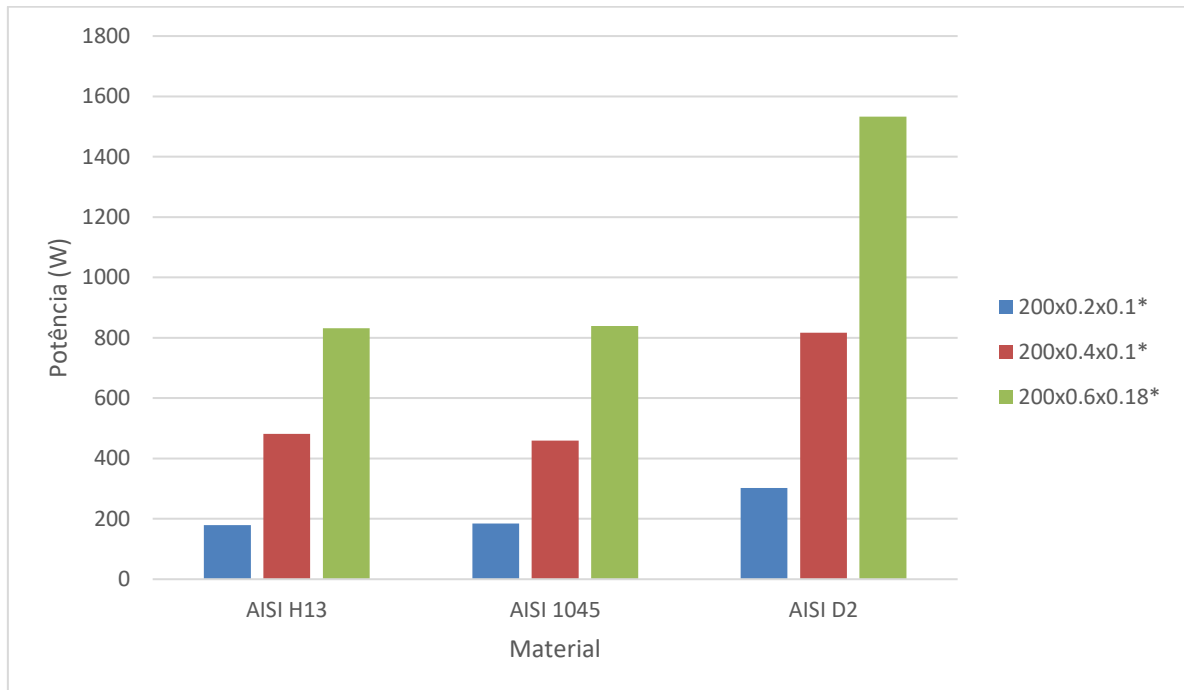


Figura 57 - Potência de corte para os diferentes materiais maquinados e condições de corte.

* Velocidade de corte(m/min) x profundidade de corte (mm) x avanço (mm/rot), válido para os próximos gráficos.

Verifica-se que ocorre um aumento gradual na potência de corte para as diferentes condições de corte, ou seja, o aumento da profundidade de corte e do avanço da ferramenta implica um aumento da potência de corte. O material que requer uma maior potência de corte, para as mesmas condições de maquinagem, é o aço AISI D2. Em relação aos restantes, não existe diferença significativa nos valores da potência de corte.

A temperatura média de corte comporta-se de forma semelhante, sendo que para os aços AISI H13 e AISI 1045 não apresenta uma variação significativa nos seus valores. Já para o aço AISI D2, os valores da temperatura média de corte apresentam valores aproximadamente duas vezes mais elevados. É ainda visível que, para o mesmo material, a temperatura média de corte sofre variações muito reduzidas. A Figura 58 ajuda a compreender o comportamento da temperatura média de corte de cada material para as diferentes condições de corte.

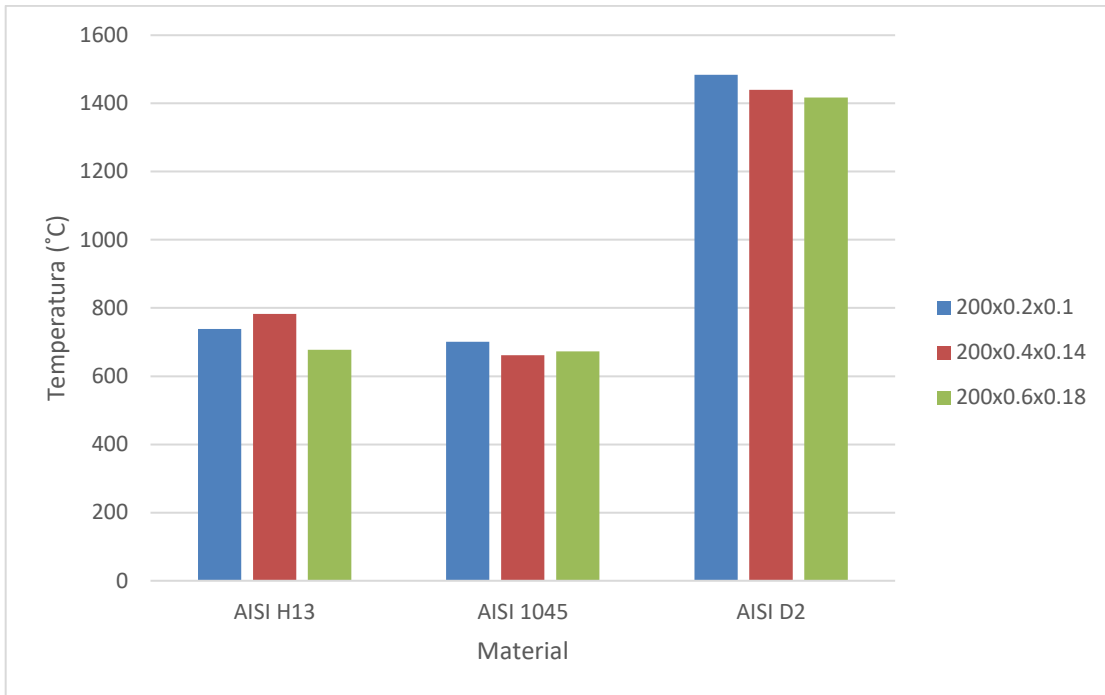


Figura 58 - Temperatura média de corte para os diferentes materiais maquinados e condições de corte.

Relativamente ao grau de recalque dos processos de corte, os seus valores estão representados na Figura 59.

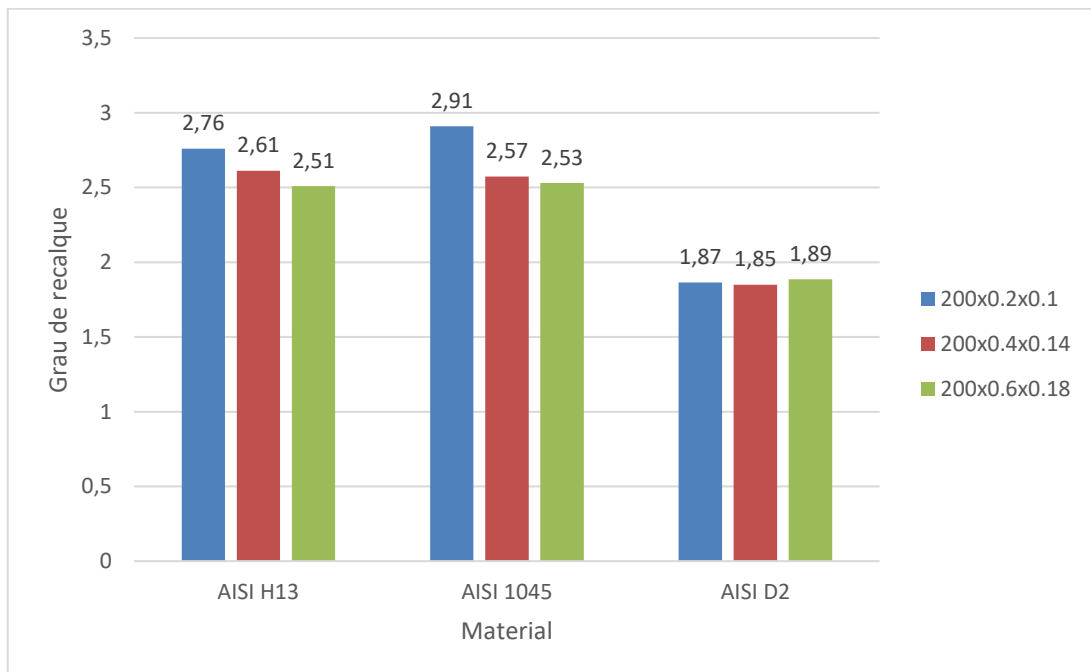


Figura 59 - Grau de recalque dos processos de corte.

Nota-se que, mais uma vez, os aços AISI H13 e AISI 1045 comportam-se de forma semelhante e os seus valores do grau de recalque são sensivelmente os mesmos dentro das mesmas condições de corte. É também notória uma diminuição significativa destes valores quando se analisa o aço AISI D2.

Por fim, a deformação angular comporta-se da mesma forma para todas as condições de corte, atingindo os maiores valores no aço AISI 1045 e os menores valores no aço AISI H13, como se pode verificar pela análise da Figura 60.

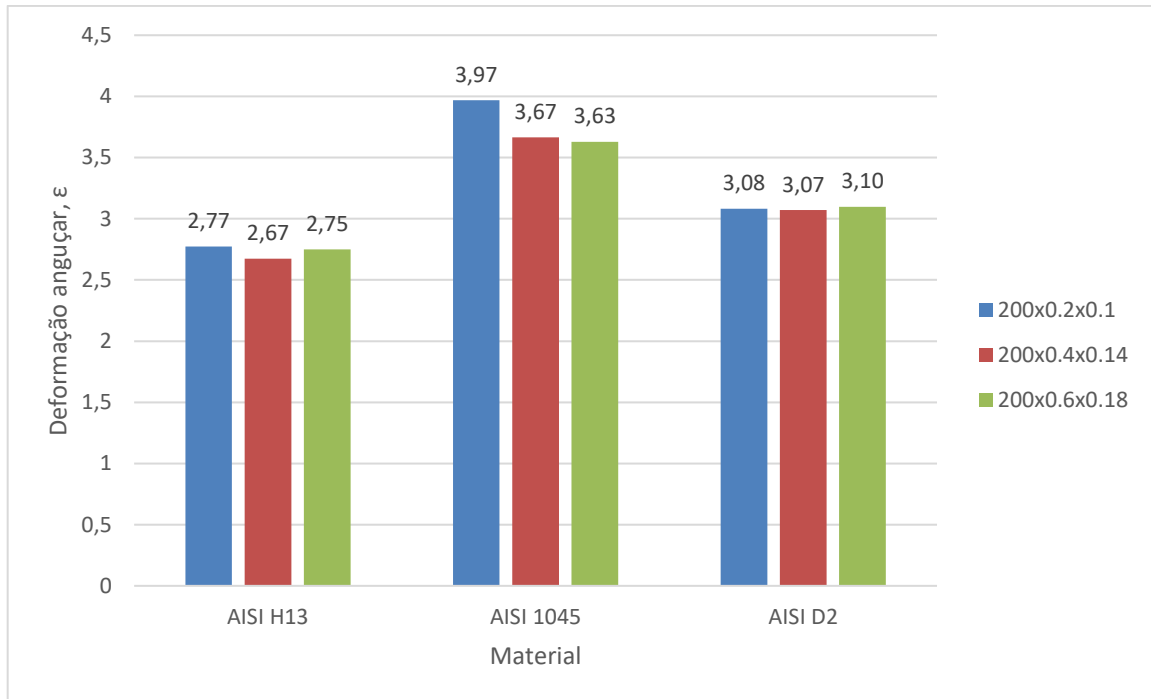


Figura 60 - Deformação angular dos processos de corte.

5. Conclusão

Neste capítulo apresentam-se as conclusões obtidas do trabalho realizado. É feita uma avaliação do desempenho do software na previsão dos fenómenos termomecânicos na maquinaria dos aços estudados, tendo em conta os resultados experimentais recolhidos na literatura. Este capítulo foi dividido em quatro secções, cada uma delas para um tópico da análise dos resultados. De uma forma geral, foram obtidos resultados bastante satisfatórios na análise numérica.

5.1. Aço AISI 1045

Em geral os valores das forças de corte e de avanço obtidos por simulação numérica FEM são inferiores aos registados experimentalmente por Ning and Liang (2018).

A partir das simulações numéricas para o corte ortogonal do aço AISI 1045 registou-se um erro relativo acumulado médio (correspondente à média das somas do erro das forças de corte e de avanço) de 20.84% comparativamente com os dados recolhidos por meio experimental por Ning and Liang (2018). Para a simulação com um avanço de 0.3 mm/rot e ângulo de ataque de 5°, registou-se um valor numérico da força de avanço superior ao experimental obtido por Ning and Liang (2018).

Na transição da velocidade de 200 m/min para 300 m/min, verificou-se que tanto a força de corte como a força de avanço diminuem, para o mesmo avanço da ferramenta e independentemente do ângulo de saída da ferramenta. De forma contrária, registou-se que quanto maior for o avanço da ferramenta maior serão as forças de corte e de avanço, para a mesma velocidade de corte e ângulo de saída da ferramenta.

Verificou-se também que o ângulo de ataque teve um papel muito influente nomeadamente na força de avanço. Para um ângulo de ataque de -7° a força de corte é consideravelmente superior em comparação com o ângulo de 5°. O mesmo efeito acontece para a força de corte, apesar de a diferença ter sido bastante inferior comparativamente à força de avanço.

Através das simulações numéricas foi ainda possível visualizar e prever as temperaturas médias e a potência de maquinaria do processo. As temperaturas médias de corte obtidas na simulação numérica FEM para os testes experimentais de Ning and Liang (2018) apresentaram tanto valores superiores como inferiores dependendo das condições de corte, com um erro relativo médio de 11.54%. Verificou-se um ligeiro aumento da temperatura média de corte das simulações face aos resultados experimentais nos testes onde a velocidade de corte toma o maior valor.

Em relação à potência de corte, esta atinge os seus valores máximos para uma profundidade de corte de 0.3 mm, e o aumento da velocidade de corte faz também aumentar o valor desta potência. O grau de recalque atinge o seu valor máximo para o maior avanço da ferramenta e para um ângulo de ataque da ferramenta de -7°. Na simulação numérica, o avanço da ferramenta representa a espessura da avara antes do corte e, por isso, este valor máximo é perfeitamente aceitável.

Em relação à deformação angular, como foi esperado, os seus valores mais elevados ocorreram para o ângulo de ataque da ferramenta negativo.

Por fim, relativamente às ferramentas de corte utilizadas, a que apresenta forças e temperaturas de corte mais baixas foi a de 5°, tendo sido a ferramenta mais adequada para estes processos de corte.

5.2. Aço AISI D2

A partir das simulações numéricas para o corte ortogonal do aço AISI D2 prevê-se que a força de corte aumente consideravelmente à medida que o avanço da ferramenta aumenta, independentemente da velocidade de corte em análise. Já a força de avanço, como é referido no tópico da análise de resultados, mantém sensivelmente a magnitude.

Apesar de serem análises diferentes (2D e 3D), o comportamento das forças de corte e de avanço obtidas numericamente é semelhante ao comportamento das mesmas forças obtidas experimentalmente por Arsecularatne *et al.* (2006). O autor verificou o mesmo aumento da força de corte com o aumento do avanço da ferramenta e a mesma estabilidade na força de avanço.

Em relação à potência de corte, esta sofre um aumento progressivo tanto com o aumento da velocidade de corte, como com o aumento do avanço da ferramenta. Para uma velocidade de corte de 70 m/min e um avanço da ferramenta de 0.08 mm/rot a potência de corte obtida foi de 264.83 W, enquanto que para uma velocidade de corte de 120 m/min e um avanço da ferramenta de 0.2 mm/rot a potência de corte obtida foi de 890.25 W, o que representa uma diferença bastante significativa.

No que diz respeito à temperatura de corte, os valores oscilam entre os 1250 °C e os 1360 °C, à exceção da simulação para um avanço de 0.08 mm/rot e velocidade de corte de 70 m/min, cujo valor ronda os 1080 °C. Nota-se um aumento progressivo da temperatura de corte à medida que a velocidade de corte aumenta, exceto para o caso de 0.2 mm/rot de avanço e 120 m/min de velocidade de corte. Esta diminuição da temperatura de corte pode ser explicada pela diminuição da força de avanço neste caso em particular, o que implica que o material tenha ficado menos macio, tornando-o mais difícil de maquinar. É também visível um menor contacto da ferramenta com a peça para este caso.

Por fim, o grau de recalque e a deformação angular apresentam também um comportamento padrão quando se varia principalmente o avanço da ferramenta. Os valores mais elevados do grau de recalque ocorrem para o menor avanço da ferramenta. Quanto maior for o avanço, menor é o grau de recalque com uma diferença bastante notória de avanço para avanço. Apesar de apresentar pouca influência no valor do grau de recalque, o aumento da velocidade de corte faz com que este valor do grau de recalque diminua. Para a deformação angular, verifica-se uma diminuição significativa com o aumento do avanço da ferramenta e velocidade de corte.

O facto de serem análises diferentes impossibilita a comparação de resultados da literatura com os resultados obtidos numericamente e, por isso, este aço serviu apenas como fundamento para dados experimentais de trabalhos futuros.

5.3. Aço AISI H13

Ao contrário do que aconteceu para o aço AISI D2, verificou-se que os valores da força de avanço sofrem grande influência do avanço da ferramenta.

As velocidades de corte não apresentaram um efeito significativo nos valores das forças de corte e de avanço. Os parâmetros de corte mais influentes na força de corte, à semelhança dos resultados obtidos para o aço AISI D2 são a profundidade de corte e o avanço da ferramenta e, neste caso, o aumento é bastante acentuado.

Em relação à potência de corte, para a mesma profundidade de corte existiu um aumento significativo do valor da potência à medida que o avanço da ferramenta aumenta. O aumento da velocidade de corte e da profundidade de corte também fez com que o valor da potência de corte aumentasse consideravelmente.

Por sua vez, a temperatura de corte sofreu alterações sobretudo quando se alterou o avanço da ferramenta. O aumento do avanço da ferramenta fez com que o valor da temperatura também subisse.

Relativamente ao grau de recalque, este teve tendência a diminuir com o aumento do avanço da ferramenta, o que é expectável. Tendo em conta a equação (5), quanto maior fosse a espessura da peça antes do corte (que aqui representa o avanço da ferramenta), menor seria o valor do grau de recalque. Da mesma forma, quando se aumentou a profundidade de corte, o valor do grau de recalque tendeu a diminuir, para o mesmo avanço da ferramenta.

Por fim, para a deformação angular, o aumento do avanço da ferramenta provocou uma diminuição no seu valor na maioria dos resultados.

5.4. Comparação da maquinabilidade dos materiais

Verificou-se que, utilizando a mesma ferramenta, foram atingidas forças de corte superiores no aço AISI D2 e que, tanto para o aço AISI 1045 como para o aço AISI H13, as forças de corte atingidas são sensivelmente as mesmas. No entanto, apesar de os aços AISI 1045 e AISI H13 se comportarem da mesma forma e atingirem valores próximos, em relação à força de avanço o aço AISI D2 apresenta valores inferiores aos restantes.

A potência de corte aumentou significativamente quando se maquinou o aço AISI D2. Para os restantes, a potência de corte assume sensivelmente os mesmos valores para as mesmas condições de corte.

Da mesma forma, no aço AISI D2 a temperatura de corte aumentou para aproximadamente o dobro em relação aos restantes aços. Como se verificou este aumento da temperatura no aço AISI D2, o material fica mais macio e torna-se mais fácil de maquinar, o que explica a diminuição da força de avanço relativamente aos outros materiais.

Como era de esperar, o grau de recalque apresentou uma tendência a diminuir com o aumento do avanço da ferramenta, exceto para o caso do aço AISI D2, onde atingiu os valores mais baixos.

Por fim, a deformação angular não é tão afetada pela alteração das condições de corte, à exceção do aço AISI 1045, cuja deformação angular apresenta uma tendência a diminuir com a diminuição

do avanço da ferramenta. É neste material que os valores da deformação angular atingem os valores mais elevados.

Deste modo, de uma forma geral e considerando todos os aspetos acima referidos, o aço AISI H13 apresenta uma melhor maquinabilidade comparativamente aos restantes. É importante notar também que o aço AISI 1045 comporta-se de uma forma muito idêntica ao aço AISI H13, diferenciando-se apenas nos valores da deformação angular, que foram mais reduzidos para o caso do aço AISI H13.

5.5. Sugestões para trabalhos futuros

Como forma de dar continuidade a este trabalho, é sugerida a realização de testes experimentais de corte ortogonal destes materiais, para condições de corte a seco e com fluido de corte, com a recolha de dados das forças de maquinagem, temperaturas e potências de corte, grau de recalque, tensões residuais, deformação angular, entre outros.

O teste de diferentes materiais para ferramentas de corte na maquinagem de aços para moldes é outro trabalho de interesse futuro. Por exemplo, um aprofundamento da parte desta dissertação que se incide na seleção do material com melhor maquinabilidade, adicionando o estudo das ferramentas que melhor maquinam cada um desses materiais em termos de forças e temperaturas de corte, forma da apara, tensões residuais na peça, etc.

Bibliografia

- Arrazola, P. J. *et al.* (2013) 'Recent advances in modelling of metal machining processes', *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 62(2), pp. 695–718. doi: 10.1016/j.cirp.2013.05.006.
- Arruda, É. M. *et al.* (2019) 'Robust optimisation of surface roughness of AISI H13 hardened steel in the finishing milling using ball nose end mills', *Precision Engineering*. Elsevier, 60(July), pp. 194–214. doi: 10.1016/j.precisioneng.2019.07.013.
- Arsecularatne, J. A. *et al.* (2006) 'On machining of hardened AISI D2 steel with PCBN tools', *Journal of Materials Processing Technology*, 171(2), pp. 244–252. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.06.079.
- Awale, A. S. *et al.* (2020) 'Multi-objective optimization of MQL mist parameters for eco-friendly grinding', *Journal of Manufacturing Processes*. Elsevier, 56(April), pp. 75–86. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.04.069.
- Ayabaca, C., Vila, C. and Abellan-Nebot, J. . (2019) 'Comparative study of Sustainability Metrics for Face Milling AISI 1045 in different Machining Centers', *Procedia Manufacturing*. Elsevier B.V., 41, pp. 523–530. doi: 10.1016/j.promfg.2019.09.039.
- Bagaber, S. A. and Yusoff, A. R. (2017) 'Multi-objective optimization of cutting parameters to minimize power consumption in dry turning of stainless steel 316', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 157, pp. 30–46. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.231.
- Behera, D. K., Tripathi, P. and Chaubey, A. K. (2018) 'Effect of Nickel on Mechanical Properties of Alloy Steel Produced by Powder Metallurgy', *Materials Today: Proceedings*. Elsevier Ltd, 5(1), pp. 1704–1710. doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.267.
- Bil, H., Kiliç, S. E. and Tekkaya, A. E. (2004) 'A comparison of orthogonal cutting data from experiments with three different finite element models', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(9), pp. 933–944. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2004.01.016.
- Borsos, B. *et al.* (2017) 'Two-dimensional finite element analysis of turning processes', *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 61(1), pp. 44–54. doi: 10.3311/PPme.9283.
- Choudhury, S. K. and Mangrulkar, K. S. (2000) 'Investigation of orthogonal turn-milling for the machining of rotationally symmetrical work pieces', *Journal of Materials Processing Technology*, 99(1), pp. 120–128. doi: 10.1016/S0924-0136(99)00397-0.
- Fallböhmer, P. *et al.* (2000) 'High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing', *Journal of Materials Processing Technology*, 98(1), pp. 104–115. doi: 10.1016/S0924-0136(99)00311-8.
- Fathallah, B. Ben, Braham, C. and Sidhom, H. (2020) 'Combined effects of abrasive type and cooling mode on fatigue resistance of AISI D2 ground surface', *International Journal of Fatigue*. Elsevier Ltd, p. 105665. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105665.
- Ghani, J. A., Choudhury, I. A. and Masjuki, H. H. (2004) 'Performance of P10 TiN coated carbide tools when end milling AISI H13 tool steel at high cutting speed', *Journal of Materials Processing Technology*, 153–154(1–3), pp. 1062–1066. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.353.
- Gomes, U. (2013) *Análise da maquinabilidade do aço inoxidável AISI 316*, University of Aveiro.
- Grzesik, W., Bartoszek, M. and Nieslony, P. (2005) 'Finite element modelling of temperature distribution in the cutting zone in turning processes with differently coated tools', *Journal of Materials Processing Technology*, 164–165, pp. 1204–1211. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.136.

- Han, K. *et al.* (1995) 'Effects of vanadium additions on microstructure and hardness of hypereutectoid pearlitic steels', *Materials Science and Engineering A*, 190(1–2), pp. 207–214. doi: 10.1016/0921-5093(94)09604-U.
- He, Q. *et al.* (2020) 'An integrative approach to coating/carbide substrate design of CVD and PVD coated cutting tools during the machining of austenitic stainless steel', *Ceramics International*, 46(4), pp. 5149–5158. doi: 10.1016/j.ceramint.2019.10.259.
- Huang, W. *et al.* (2018) 'Comparison in surface integrity and fatigue performance for hardened steel ball-end milled with different milling speeds', *Procedia CIRP*. Elsevier B.V., 71, pp. 267–271. doi: 10.1016/j.procir.2018.05.059.
- Huang, Y. and Liang, S. Y. (2003) 'Cutting forces modeling considering the effect of tool thermal property—Application to CBN hard turning', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(3), pp. 307–315. doi: 10.1016/S0890-6955(02)00185-2.
- Jiang, F., Yan, L. and Rong, Y. (2013) 'Orthogonal cutting of hardened AISI D2 steel with TiAlN-coated inserts - Simulations and experiments', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64(9–12), pp. 1555–1563. doi: 10.1007/s00170-012-4122-3.
- Kitamura, T. *et al.* (2020) 'Performance evaluation method for cutting fluids using cutting force in micro-feed end milling', *Precision Engineering*. Elsevier Inc., 62(December 2019), pp. 232–243. doi: 10.1016/j.precisioneng.2019.12.007.
- Korloy (2020) *Korloy*. Available at: <http://www.korloy.com/pt/main/main.do>.
- Krolczyk, G. M. *et al.* (2019) 'Ecological trends in machining as a key factor in sustainable production – A review', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 218, pp. 601–615. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.017.
- Kumar, P. and Chauhan, S. R. (2015) 'Machinability Study on Finish Turning of AISI H13 Hot Working Die Tool Steel With Cubic Boron Nitride (CBN) Cutting Tool Inserts Using Response Surface Methodology (RSM)', *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(5), pp. 1471–1485. doi: 10.1007/s13369-015-1606-0.
- Li, X. *et al.* (2016) 'The effect of manganese content on mechanical properties of high titanium microalloyed steels', *Materials Science and Engineering A*. Elsevier, 677, pp. 340–348. doi: 10.1016/j.msea.2016.09.070.
- Liew, P. J. *et al.* (2017) 'An overview of current status of cutting fluids and cooling techniques of turning hard steel', *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Elsevier Ltd, 114, pp. 380–394. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.077.
- Lin, T. *et al.* (2018) 'Effects of chromium and carbon content on microstructure and properties of TiC-steel composites', *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. Elsevier, 72(December 2017), pp. 228–235. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2017.12.037.
- Liu, J. *et al.* (2019) 'Characteristics and cutting performance of the CVD coatings on the TiCN-based cermets in turning hardened AISI H13 steel', *Journal of Materials Research and Technology*. The Authors, 9(2), pp. 1389–1399. doi: 10.1016/j.jmrt.2019.11.065.
- Liu, R. *et al.* (2017) 'An Investigation of Side Flow during Chip Formation in Orthogonal Cutting', *Procedia Manufacturing*. The Author(s), 10, pp. 568–577. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.053.
- Lu, S. *et al.* (2017) 'Enhancement of wear resistance of AISI 1045 steel by a two-step plasma treatment', *Vacuum*. Elsevier Ltd, 145, pp. 153–157. doi: 10.1016/j.vacuum.2017.08.026.
- Lyu, J. *et al.* (2006) 'a Case Study Approach on the Development of Design Chain Operations

Reference-Model in the Mold Industry', *International Journal of Electronic Business Management*, 4(2), pp. 113–122.

Mallick, R. *et al.* (2020) 'Materials Today : Proceedings Performance characteristics of hardened AISI D2 steel turning : A review', *Materials Today: Proceedings*. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.565.

Mebrahitom, A., Choon, W. and Azhari, A. (2017) 'Side Milling Machining Simulation Using Finite Element Analysis: Prediction of Cutting Forces', *Materials Today: Proceedings*. Elsevier Ltd, 4(4), pp. 5215–5221. doi: 10.1016/j.matpr.2017.05.029.

Medina-Clavijo, B. *et al.* (2018) 'Microstructural aspects of the transition between two regimes in orthogonal cutting of AISI 1045 steel', *Journal of Materials Processing Technology*. Elsevier, 260(May), pp. 87–96. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.05.016.

Moganapriya, C. *et al.* (2020) 'Technical performance of nano-layered CNC cutting tool inserts – An extensive review', *Materials Today: Proceedings*. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.731.

Ning, J. and Liang, S. (2018) 'Prediction of Temperature Distribution in Orthogonal Machining Based on the Mechanics of the Cutting Process Using a Constitutive Model', *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(2), p. 37. doi: 10.3390/jmmp2020037.

Özbek, O. and Saruhan, H. (2020) 'The effect of vibration and cutting zonetemperature on surface roughness and tool wear ineco-friendly MQL turning of AISI D2', *Journal of Materials Research and Technology*. Korea Institute of Oriental Medicine, pp. 1–11. doi: 10.1016/j.jmrt.2020.01.010.

Pinto Soares (2019) *Aços - Características, Tratamentos*. 6ª edição.

Prakash Marimuthu, K., Thirtha Prasada, H. P. and Chethan Kumar, C. S. (2017) 'Force, stress prediction in drilling of AISI 1045 steel using finite element modelling', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 225. doi: 10.1088/1757-899X/225/1/012030.

Priyadarshini, A., Pal, S. K. and Samantaray, A. K. (2011) 'Influence of the Johnson Cook Material Model Parameters and Friction Models on Simulation of Orthogonal Cutting Process'.

Rajeshshyam, R., Krishnaraj, V. and Thillairajan, K. (2020) 'An experimental investigation on machinability factors of EN alloy steels – A comparative study', *Materials Today: Proceedings*. Elsevier Ltd, pp. 6–13. doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.519.

Ramada Aços (2020) *RAMADA AÇOS - Special Steel Soluções*. Available at: <https://www.ramada.pt/pt/>.

Revuru, R. S. *et al.* (2018) 'Development of finite element based model for performance evaluation of nano cutting fluids in minimum quantity lubrication', *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. CIRP, 21, pp. 75–85. doi: 10.1016/j.cirpj.2018.02.005.

Salunkhe, S. *et al.* (2015) 'Effect of Single and Double Austenitization Treatments on the Microstructure and Hardness of AISI D2 Tool Steel', *Materials Today: Proceedings*. Elsevier Ltd., 2(4–5), pp. 1901–1906. doi: 10.1016/j.matpr.2015.07.145.

Sandvik Coromant (2020) *Sandvik Coromant*. Available at: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/pages/default.aspx>.

Santos das Neves, G. P. (2010) 'Simulação Numérica por Elementos Finitos da Maquinagem de Titânio e Suas Ligas.', p. 135.

Saravanamurugan, S. *et al.* (2020) 'Materials Today : Proceedings Optimization of cutting tool geometry and machining parameters in turning process', *Materials Today: Proceedings*. Elsevier

Ltd. doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.246.

Sarma, D. K. and Rajbongshi, S. K. (2020) 'A study in turning of AISI D2 steel with textured and non-textured coated carbide tool at the flank face', *Materials Today: Proceedings*. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.matpr.2019.12.223.

Shibuya, M. *et al.* (2011) 'Effect of nickel and cobalt addition on the precipitation-strength of 15Cr ferritic steels', *Materials Science and Engineering A*. Elsevier B.V., 528(16–17), pp. 5387–5393. doi: 10.1016/j.msea.2011.03.088.

Simoneau, A., Ng, E. and Elbestawi, M. A. (2007) 'Grain size and orientation effects when microcutting AISI 1045 steel', *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(1), pp. 57–60. doi: 10.1016/j.cirp.2007.05.016.

Sousa, M. do N. *et al.* (2015) 'Grau De Recalque E Zona De Fluxo Em Usinagem De Ligas De Alumínio - Otimização Multiobjetivo E Técnicas De Metamodelagem', (April), pp. 834–843. doi: 10.5151/mathpro-cnmai-0154.

Suresh, R., Basavarajappa, S. and Samuel, G. L. (2012) 'Predictive modeling of cutting forces and tool wear in hard turning using response surface methodology', *Procedia Engineering*, 38, pp. 73–81. doi: 10.1016/j.proeng.2012.06.011.

Tang, L., Huang, J. and Xie, L. (2011) 'Finite element modeling and simulation in dry hard orthogonal cutting AISI D2 tool steel with CBN cutting tool', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(9–12), pp. 1167–1181. doi: 10.1007/s00170-010-2901-2.

Tian, Y. *et al.* (2020) 'The effect of nickel on corrosion behaviour of high-strength low alloy steel rebar in simulated concrete pore solution', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 246, p. 118462. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118462.

Uma Devi, M., Chakraborty, T. K. and Mohanty, O. N. (1999) 'Wear behaviour of plasma nitrided tool steels', *Surface and Coatings Technology*. Elsevier Science S.A., 116–119, pp. 212–221. doi: 10.1016/S0257-8972(99)00118-8.

Ward, T. S. *et al.* (2005) 'A study of mechanical alloying processes using reactive milling and discrete element modeling', *Acta Materialia*, 53(10), pp. 2909–2918. doi: 10.1016/j.actamat.2005.03.006.

Wegener, K. *et al.* (2016) 'Success Story Cutting', *Procedia CIRP*. Elsevier B.V., 46, pp. 512–524. doi: 10.1016/j.procir.2016.04.110.

Yan, H., Hua, J. and Shivpuri, R. (2005) 'Numerical simulation of finish hard turning for AISI H13 die steel', *Science and Technology of Advanced Materials*, 6(5), pp. 540–547. doi: 10.1016/j.stam.2005.04.002.

Zetek, M., Česáková, I. and Švarc, V. (2014) 'Increasing cutting tool life when machining inconel 718', *Procedia Engineering*, 69, pp. 1115–1124. doi: 10.1016/j.proeng.2014.03.099.

Zhang, Q., Zhang, S. and Li, J. (2017) 'Three Dimensional Finite Element Simulation of Cutting Forces and Cutting Temperature in Hard Milling of AISI H13 Steel', *Procedia Manufacturing*. The Author(s), 10, pp. 37–47. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.018.

Zinov'ev, D. V. and Sole, P. (2004) 'Quaternary codes and biphasic sequences from Z8-codes', *Problemy Peredachi Informatsii*, 40(2), pp. 50–62. doi: 10.1023/B.