

# Estudo do corte ortogonal em materiais metálicos no torneamento com diferentes tipos de refrigeração

Kathlen Lopes Fazzion Ribeiro <sup>1</sup>, Étory Madriles Arruda <sup>2</sup>, Robson Bruno Dutra Pereira <sup>3</sup>, Carlos Henrique Lauro <sup>4</sup>, Lincoln Cardoso Brandão <sup>5</sup>

<sup>1</sup>Centro de Inovação em Manufatura Sustentável, Universidade Federal de São João del-Rei, Brasil. Email: [kathlen.fazzion@hotmail.com](mailto:kathlen.fazzion@hotmail.com)

<sup>2</sup>Centro de Inovação em Manufatura Sustentável, Universidade Federal de São João del-Rei, Brasil. Email: [etory@ufsj.edu.br](mailto:etory@ufsj.edu.br)

<sup>3</sup>Centro de Inovação em Manufatura Sustentável, Universidade Federal de São João del-Rei, Brasil. Email: [robsondutra@ufsj.edu.br](mailto:robsondutra@ufsj.edu.br)

<sup>4</sup>Centro de Inovação em Manufatura Sustentável, Universidade Federal de São João del-Rei, Brasil. Email: [carloslauro@ufsj.edu.br](mailto:carloslauro@ufsj.edu.br)

<sup>5</sup>Centro de Inovação em Manufatura Sustentável, Universidade Federal de São João del-Rei, Brasil. Email: [lincoln@ufsj.edu.br](mailto:lincoln@ufsj.edu.br)

## Resumo

Com o objetivo de estudar o corte ortogonal em três materiais distintos, o aço 4340, o Aço Inox 304 e o Titânio grau 5, foram realizados experimentos sem refrigeração, com refrigeração por ar comprimido e com o uso de um sistema de ar gelado. Foram adotados 3 níveis de velocidade e de avanço. Os resultados demonstraram que o avanço é o parâmetro de corte que tem maior influência no valor do coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco. Para o aço 4340, a utilização de refrigeração colaborou para a diminuição do coeficiente de atrito. Para o aço Inox 304, a presença de refrigeração não proporcionou alterações significativas. Por outro lado, para o Titânio grau 5, considerando as velocidades menores, a presença de refrigeração ocasionou um aumento no valor do coeficiente de atrito, enquanto, para a velocidade maior, houve uma pequena diminuição deste ou não houve alterações significativas.

**Palavras-chave:** processos de usinagem; corte ortogonal; torneamento; refrigeração.

## Abstract

The objective of this study was to investigate orthogonal cutting in three different materials: SAE 4340 steel, AISI 304 stainless steel, and Grade 5 titanium. Experiments were carried out without cooling, with compressed air cooling, and using a chilled air system. Three levels of cutting speed and feed rate were adopted. The results showed that feed rate was the machining parameter with the greatest influence on the coefficient of friction between the tool and the chip. For SAE 4340 steel, the use of compressed air cooling helped reduce the coefficient of friction. For AISI 304 stainless steel, the presence of compressed air cooling did not provide significant changes. On the other hand, for Grade 5 titanium, considering lower cutting speeds, the presence of compressed air cooling generated an increase in the coefficient of friction value, while at higher cutting speeds, there was a slight decrease or no significant changes.

**Keywords:** machining processes; orthogonal cutting; turning; refrigeration.

## 1. Introdução

O setor manufatureiro corresponde à 11,8 % do Produto Interno Bruto brasileiro (dados de 2017). Considerando que este valor era de 20,7% em 1981, percebe-se que a indústria de transformação brasileira

decaiu nos últimos anos. Retomar o avanço deste setor no Brasil é essencial, uma vez que este é imprescindível para produção de inovações tecnológicas e para o desenvolvimento econômico do país [1].

Os processos de fabricação fazem parte do setor manufatureiro, sendo a usinagem um dos que se destacam. A usinagem é uma operação que visa conferir à uma peça formas, dimensões e acabamento, através da remoção de cavacos. Trata-se de um processo complexo devido à dificuldade de determinação exata das condições ideais de corte, que são decorrentes da imprevisibilidade das variáveis e da enorme variedade de combinações possíveis dos parâmetros de entrada deste processo [2].

Dentre os processos de usinagem está o torneamento, que, segundo Song [3], compõe cerca que um quinto de todas as operações de corte de metais na indústria moderna. De acordo com o autor, o torneamento é um dos processos mais essenciais para remoção de material utilizando-se ferramentas de ponta única. Segundo Rao et al. [4], o torneamento tem substituído até mesmo a retificação em várias aplicações com o intuito de diminuir o tempo de fabricação, sem que a qualidade superficial da peça seja alterada.

A operação de torneamento usando uma ferramenta de corte de ponta única é uma das mais antigas e populares para corte de metais. O corte ortogonal foi assumido como a operação básica para o estudo do processo de torneamento usando ferramenta de ponta única, desde a abordagem fundamental da mecânica do corte, no século passado [3].

O termo corte ortogonal foi usado por Merchant [5] para definir os casos nos quais a ferramenta de corte gera uma superfície plana e paralela em relação a superfície plana original do material a ser usinado, e é ajustado com sua aresta de corte perpendicular à direção do movimento relativo da ferramenta e peça de trabalho. Merchant propôs em 1940, um modelo mundialmente conhecido na área de usinagem relacionado com a formação de cavacos e baseado no processo de cisalhamento concentrado [6].

Shaw [6] afirma que o corte ortogonal, quando em um estado estável, apresenta na sua mecânica de corte algumas características:

- A ferramenta está perfeitamente afiada e não há contato ao longo da face de folga.
- A superfície de cisalhamento é um plano que se estende para cima a partir da aresta de corte.
- A aresta de corte é uma linha reta que se estende perpendicularmente à direção do movimento e gera uma superfície plana à medida que o trabalho passa por ela.
- O cavaco não flui para nenhum dos lados (tensão plana).
- A profundidade de corte é constante.
- A largura da ferramenta é maior que a largura da peça de trabalho.
- O trabalho se move em relação à ferramenta com velocidade uniforme.
- O cavaco contínuo é produzido sem aresta postiça.

i) As tensões normais e de cisalhamento ao longo do plano de cisalhamento e da ferramenta são uniformes.

Este trabalho teve como objetivo estudar o corte ortogonal em três materiais distintos, o Aço SAE 4340, o Aço Inox 304 e o Titânio grau 5, através da realização de experimentos sem refrigeração (corte a seco), com refrigeração por ar comprimido e utilizando um sistema de ar gelado. Os experimentos foram analisados com base no valor do coeficiente de atrito, calculado através da obtenção dos valores dos esforços de corte, que foram empregados no modelo de corte ortogonal proposto por Merchant.

De acordo com de Jesus (2019) [7], para o cálculo do atrito entre a superfície de ataque da ferramenta e o cavaco, no corte ortogonal, é aplicável o modelo de atrito de Coulomb, conforme a equação 1:

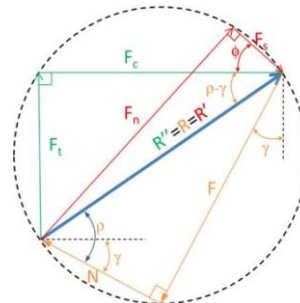
$$\mu = \frac{F}{N} \quad (1)$$

Através do círculo proposto por Merchant, apresentado na Figura 1, tem-se as equações 2 e 3:

$$N = F_c \times \cos\gamma - F_t \times \sin\gamma \quad (2)$$

$$F = F_c \times \sin\gamma - F_t \times \cos\gamma \quad (3)$$

Onde  $F_c$  é a força de corte e  $F_t$  é a força de corte normal, que no caso do corte ortogonal, coincide com a força de avanço.



**Figura 1.** Círculo de Merchant. (Fonte: (DE JESUS, 2019))

Substituindo as equações 2 e 3 na equação 1:

$$\mu = \frac{F_c \times \sin\gamma - F_t \times \cos\gamma}{F_c \times \cos\gamma - F_t \times \sin\gamma} \quad (4)$$

Desta forma, percebe-se que é possível, com a definição experimental das forças atuantes no plano de trabalho, definir os valores dos coeficientes de atrito para materiais distintos e verificar a influência dos sistemas de resfriamento empregados no processo de torneamento. Assim, pelo fato de o processo de torneamento vir sendo muito estudado nos últimos tempos, torna-se interessante modelar e prever quantitativamente as componentes e características da operação, e dessa maneira, melhorar o desempenho dos processos de usinagem [8]. Considerando que o torneamento com ferramenta de ponta única é amplamente utilizado na indústria e pode ser estudado

basicamente através do processo de corte ortogonal, se faz interessante e necessário a realização de estudos desse processo para que este seja cada vez mais compreendido.

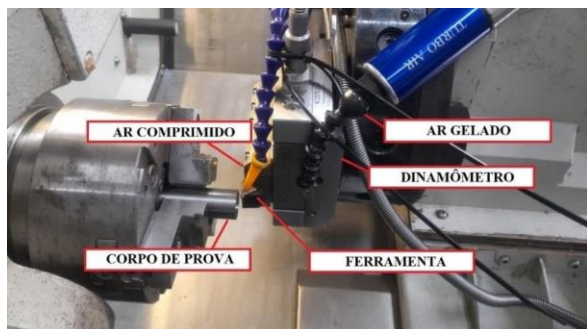
Além disso, segundo Tsekhanov et al. [9], apesar de as operações de corte possuírem grande importância econômica e técnica, essas operações estão entre as menos compreendidas de todos os processos de fabricação, devido à grande complexidade dos eventos simultâneos que ocorrem nas zonas de cisalhamento. Dessa maneira, este estudo visa abranger as questões relacionadas as características do corte ortogonal no torneamento de diferentes materiais metálicos e dessa forma colaborar para a indústria de um modo geral.

## 2. Metodologia

### 2.1. Materiais e equipamentos

#### 2.1.1. Máquina-ferramenta

Os experimentos foram conduzidos em um Torno CNC Romi GL 240-M com velocidade de avanço rápido longitudinal e transversal de 30 m/min, rotação máxima de 6.000 rpm e potência máxima na árvore de 22,5 kW, sendo programado por um comando CNC Fanuc Oi TD. A Figura 2 apresenta o setup experimental, mostrando o corpo de prova, a ferramenta, o dinamômetro para medição dos esforços de corte e os mecanismos de refrigeração a ar comprimido e a ar gelado.



**Figura 2.** Setup experimental. (Fonte: elaboração própria)

#### 2.1.2. Ferramentas

As ferramentas utilizadas foram duas, a ferramenta com especificação TCMT 16 T3 08-UM 4425, para o corte de do Aço SAE 4340, e a ferramenta com especificação TCMT 16 T3 08-UM 1115, para o corte do Aço Inox 304 e do Titânio Grau 5. Ambas são da marca Sandvik Coromant e foram fixadas em um suporte STGCL 2020K 16 da mesma marca. Além disso, as duas ferramentas possuem ângulo de folga igual a 7° e ângulo de saída igual a 11°. O ângulo da aresta principal da ferramenta é de 93°, mas este foi

corrigido na montagem do experimento para 90°, para que se adequasse ao corte ortogonal.

#### 2.1.3. Corpos de Prova

##### 2.1.3.1 Aço 4340

O Aço SAE 4340 também conhecido como aço carbono ao Cromo-Níquel-Molibdênio é uma liga de aço mais resistente que o aço carbono comum. Os elementos da liga melhoram a resposta do aço ao tratamento térmico (temperado e revenido) e possibilitam maior resistência mecânica. Os corpos de prova do Aço SAE 4340 foram tubos cilíndricos com 28 mm de diâmetro.

##### 2.1.3.2 Aço Inox 304

Ferro, carbono e no mínimo 10,5% de cromo, esta é, basicamente, a composição dos aços inox. Esta composição lhe proporciona vantagens químicas e físicas, destacando-se a capacidade antiferrugem, em relação a outras ligas metálicas. Entretanto, a composição do aço inox pode receber outros elementos como níquel, silício e fósforo, entre outros, com diferentes quantidades, conferindo mais ou menos dureza, mais ou menos resistência contra corrosão, mais ou menos conformabilidade. Os corpos de prova do Aço Inox 304 foram tubos cilíndricos com 18 mm de diâmetro.

##### 2.1.3.3 Titânio Grau 5

As principais características do Titânio grau 5 são baixa densidade (4,4 g/cm³) com alta resistência mecânica, boa resistência à corrosão, tendo uma excelente leveza e sendo endurecível por precipitação. Suas principais aplicações são aeronáuticas, aeroespaciais, marítimas, automobilísticas, geração de energia, químicas, papel e celulose. Os corpos de prova do Titânio Grau 5 foram tubos cilíndricos com 20 mm de diâmetro.

#### 2.1.4. Parâmetros de Corte

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de corte utilizados nos experimentos. Estes parâmetros foram combinados entre si, tendo sido realizados 27 experimentos para cada condição de corte. Foram realizados experimentos em três condições, a saber, corte a seco, refrigeração por ar comprimido e refrigeração por ar gelado (-2 °C). Dessa maneira, foram realizados um total de 81 experimentos.

Tabela 1. Parâmetros de corte.

Fonte: Elaboração Própria

A profundidade de corte (ap) foi de 1,5 mm para todos os experimentos. O comprimento de corte foi de 2 mm para as velocidades de corte de 95 e 210 m/min, e de 3 mm para a velocidade de corte de 330 m/min.

## 2.2. Variáveis de Resposta

### 2.2.1 Medição dos Esforços de Usinagem

Os esforços de usinagem foram medidos por um Dinamômetro piezoelétrico estacionário com quatro canais Kistler® 9272 e foi utilizado também um amplificador de sinais Kistler® 5070A juntamente com o software DynoWare. A taxa de aquisição foi de 10.000 Hz, para uma captura detalhada e precisa das forças envolvidas no processo, possibilitando uma análise minuciosa das condições de usinagem. As forças foram processadas pelos valores médios. Os dados de força foram posteriormente organizados e analisados nos softwares Matlab e Excel.

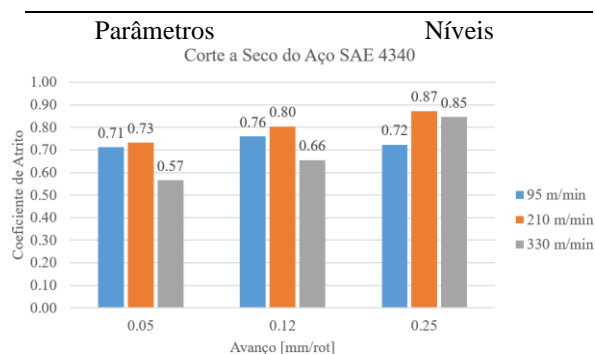
### 2.2.2 Cálculo do Coeficiente de Atrito

O Coeficiente de atrito foi calculado a partir dos esforços de corte medidos, com base no círculo de Merchant e o modelo de atrito de Coulomb, de acordo com a equação (4).

## 3. Resultados

### 3.1. Aço 4340

A Figura 3 apresenta os valores do Coeficiente de Atrito para o Aço SAE 4340, em função da variação do avanço e da velocidade de corte, no corte a seco. Para todos os valores de avanço, nota-se uma tendência de um valor mais alto de coeficiente de atrito para a velocidade de 210 m/min. Para as faixas de avanço de 0,05 e 0,12 mm/rot o coeficiente de atrito foi menor para a velocidade de 330 m/min e para o avanço de 0,25 mm/rot, ele foi menor para a velocidade de 95 m/min. Fixando a velocidade em 95 m/min, observa-se que o valor do coeficiente de atrito apresentou uma aleatoriedade em função do aumento do avanço. Em contrapartida, fixando a velocidade em 210 m/min e depois em 330 m/min, percebe-se uma tendência ao aumento do coeficiente de atrito ao se aumentar o valor do avanço.



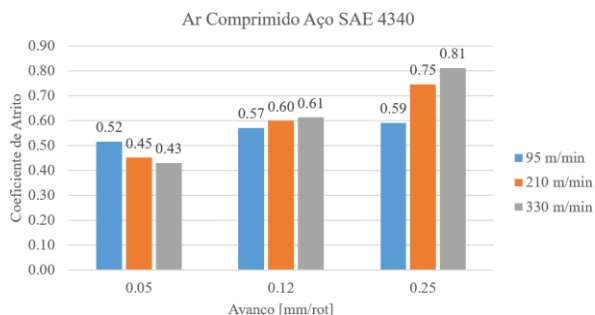
**Figura 3.** Coeficiente de Atrito para o Aço SAE 4340 no Corte a Seco. (Fonte: Elaboração Própria)

Considerando-se apenas a menor e a maior velocidade de corte, pode-se observar que, para o avanço de 0,05 mm/rot, o aumento da velocidade de corte de 95 m/min para 330 m/min, ocasionou uma queda no valor do coeficiente de atrito de 19,71%. Para o avanço de 0,12 mm/rot, considerando a mesma variação de velocidade, também houve uma queda no coeficiente de atrito, de 13,16%. Já para o avanço de 0,25 mm/rot, aconteceu exatamente o contrário, o aumento da velocidade proporcionou um aumento no coeficiente de atrito de 18,05%.

Observa-se que para todas as velocidades existe uma tendência ao crescimento do coeficiente de atrito, exceto para o valor de 0,72 com 95 m/min de velocidade e avanço de 0,25 mm/rot.

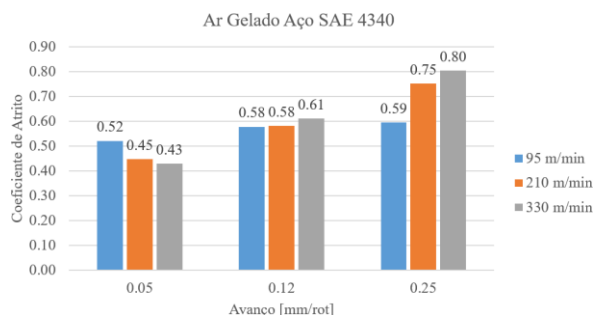
A Figura 4 apresenta os valores do Coeficiente de Atrito para o Aço SAE 4340, em função da variação do avanço e da velocidade de corte, no corte com refrigeração por ar comprimido. Ao se fixar o valor da velocidade de corte, observa-se que para todas as faixas de velocidade, o aumento no avanço ocasionou um aumento no coeficiente de atrito.

Foi possível perceber que para o avanço de 0,05, o aumento da velocidade de corte de 95 m/min para 330 m/min, ocasionou uma queda no valor do coeficiente de atrito de 17,3%. Já para as outras duas faixas de avanço, aconteceu exatamente o contrário, o aumento da velocidade proporcionou um aumento no coeficiente de atrito. Para o avanço de 0,12 mm/rot, o aumento da velocidade de corte de 95 m/min para 330 m/min, ocasionou um aumento no valor do coeficiente de atrito de 7,02%, e para o avanço de 0,25 mm/rot, essa mesma variação na velocidade ocasionou o aumento do coeficiente de atrito em 37,29%.



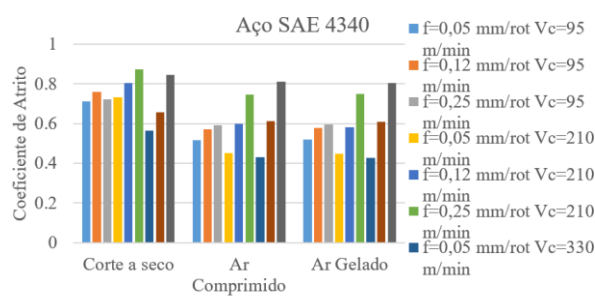
**Figura 4.** Coeficiente de Atrito para o Aço SAE 4340 utilizando Ar Comprimido como refrigeração. (Fonte: Elaboração Própria)

A Figura 5 apresenta os valores do Coeficiente de Atrito para o Aço SAE 4340, em função da variação do avanço e da velocidade de corte, no corte com refrigeração por ar gelado. Ao se fixar o valor da velocidade de corte, observa-se que para todas as faixas de velocidade, o aumento no avanço ocasionou um aumento no coeficiente de atrito. Foi possível perceber que para o avanço de 0,05, o aumento da velocidade de corte de 95 m/min para 330 m/min, ocasionou uma queda no valor do coeficiente de atrito de 17,3%. Já para as outras duas faixas de avanço, aconteceu exatamente o contrário, o aumento da velocidade proporcionou um aumento no coeficiente de atrito. Para o avanço de 0,12 mm/rot, o aumento da velocidade de corte de 95 m/min para 330 m/min, ocasionou um aumento no valor do coeficiente de atrito de 5,17%, e para o avanço de 0,25 mm/rot, essa mesma variação na velocidade ocasionou o aumento do coeficiente de atrito em 35,59%.



**Figura 5.** Coeficiente de Atrito para o Aço SAE 4340 utilizando Ar Gelado como refrigeração. (Fonte: Elaboração Própria)

A Figura 6 apresenta uma visão geral dos valores de coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco, no torneamento do Aço SAE 4340 em função das três condições de corte empregadas, a saber, corte a seco, corte com refrigeração por ar comprimido e por ar gelado. A variação geral do coeficiente de atrito ficou entre 0,43 (resultado obtido para o resfriamento por ar comprimido e os parâmetros de corte de  $f = 0,05$  mm/rot e  $V_c = 330$  m/min) e 0,87 (resultado obtido para o corte a seco e os parâmetros de corte de  $f = 0,25$  mm/rot e  $V_c = 210$  m/min).



**Figura 6.** Coeficiente de Atrito para o Aço SAE 4340 em função da refrigeração e dos parâmetros de corte. (Fonte: Elaboração Própria)

Os experimentos com o Aço SAE 4340 demonstraram que o uso de algum tipo de refrigeração proporcionou uma queda significativa no valor do coeficiente de atrito, não havendo diferenças significativas entre o ar comprimido e o ar gelado. De acordo com [10], o corte a seco em aços gera um aumento significativo na temperatura, gerando assim um nível mais alto de abrasão, difusão e oxidação. Sendo assim o uso de refrigeração tanto com ar comprimido como com o uso do ar gelado se mostrou interessante neste caso. Pode-se observar também que tanto o avanço quanto a velocidade de corte tiveram influência no valor do coeficiente de atrito. Entretanto, o avanço se mostrou com uma influência mais significativa no processo de torneamento independente do sistema de refrigeração empregado.

### 3.2. Aço Inox 304

A Figura 7 apresenta os valores do Coeficiente de Atrito para o Aço Inox 304, em função da variação do avanço e da velocidade de corte, no corte a seco. Fixando a velocidade em 95 m/min, observa-se que o valor do coeficiente de atrito apresentou uma aleatoriedade em função do aumento do avanço. Em contrapartida, fixando a velocidade em 210 m/min e depois em 330 m/min, percebe-se uma tendência ao aumento do coeficiente de atrito ao se aumentar o valor do avanço. Porém, cabe ressaltar que o valor de 0,60 para a velocidade de corte de 95 m/min com o avanço de 0,25 mm/rot.

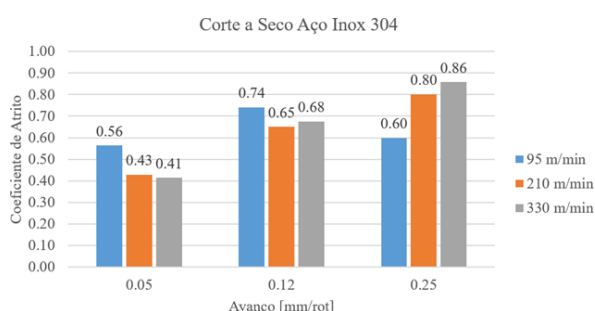
Ao se fixar o avanço, observa-se uma tendência de diminuição do valor do coeficiente de atrito em função do aumento da velocidade de corte, para as faixas de avanço de 0,05 e de 0,12 mm/rot. Já para o avanço de 0,25 mm/rot, houve uma tendência de aumento do coeficiente de atrito à medida que a velocidade de corte aumentou. Por outro lado, uma análise mais focada nos valores de 0,65 e 0,68 para o avanço de 0,12 mm/rot confirmará se para este intervalo de valores realmente



existirá uma tendência a redução com base na verificação do valor de 0,68 de atrito.

Pode-se observar que, para o avanço de 0,05 mm/rot, o aumento da velocidade de corte de 95 m/min para 330 m/min, ocasionou uma queda no valor do coeficiente de atrito de 26,78%. Para o avanço de 0,12 mm/rot, considerando a mesma variação de velocidade, também houve uma queda no coeficiente de atrito, de 8,11%. Já para o avanço de 0,25 mm/rot, aconteceu exatamente o contrário,

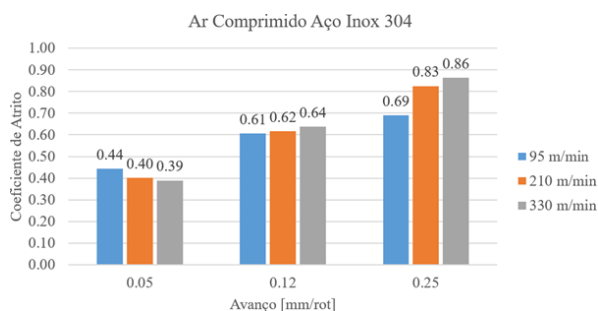
o aumento da velocidade proporcionou um aumento no coeficiente de atrito de 43,33%.



**Figura 7.** Coeficiente de Atrito para o Aço Inox 304 no corte a seco. (Fonte: Elaboração Própria)

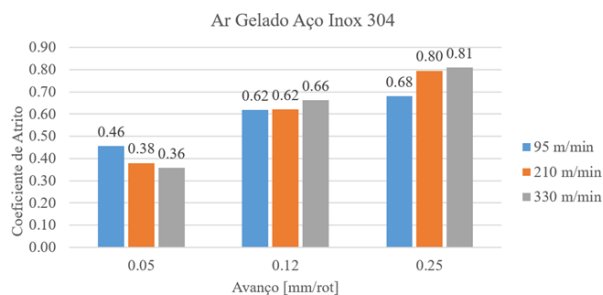
A Figura 8 apresenta os valores do Coeficiente de Atrito para o Aço Inox 304, em função da variação do avanço e da velocidade de corte, no corte com refrigeração por ar comprimido. Ao se fixar o valor da velocidade de corte, observa-se que para todas as faixas de velocidade, o aumento no avanço ocasionou um aumento no coeficiente de atrito.

Foi possível perceber que para o avanço de 0,05, o aumento da velocidade de corte de 95 m/min para 330 m/min, ocasionou uma queda no valor do coeficiente de atrito de 11,36%. Já para as outras duas faixas de avanço, aconteceu exatamente o contrário, o aumento da velocidade proporcionou um aumento no coeficiente de atrito. Para o avanço de 0,12 mm/rot, o aumento da velocidade de corte de 95 m/min para 330 m/min, ocasionou um aumento no valor do coeficiente de atrito de 4,92%, e para o avanço de 0,25 mm/rot, essa mesma variação na velocidade ocasionou o aumento do coeficiente de atrito em 24,64%.



**Figura 8.** Coeficiente de Atrito para o Aço Inox 304 utilizando Ar Comprimido como refrigeração. (Fonte: Elaboração Própria)

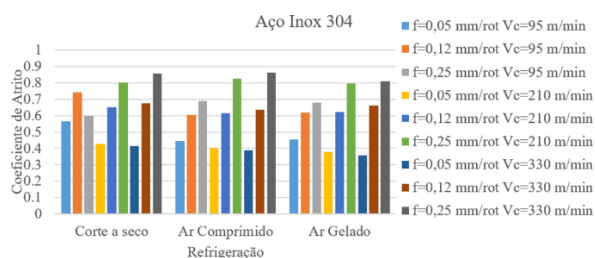
A Figura 9 apresenta os valores do Coeficiente de Atrito para o Aço Inox 304, em função da variação do avanço e da velocidade de corte, no corte com refrigeração por ar gelado. Ao se fixar o valor da velocidade de corte, observa-se que para todas as faixas de velocidade, o aumento no avanço ocasionou um aumento no coeficiente de atrito.



**Figura 9.** Coeficiente de Atrito para o Aço Inox 304 utilizando Ar Gelado como refrigeração.. (Fonte: Elaboração Própria)

Foi possível perceber que para o avanço de 0,05, o aumento da velocidade de corte de 95 m/min para 330 m/min, ocasionou uma queda no valor do coeficiente de atrito de 21,74%. Já para as outras duas faixas de avanço, aconteceu exatamente o contrário, o aumento da velocidade proporcionou um aumento no coeficiente de atrito. Para o avanço de 0,12 mm/rot, o aumento da velocidade de corte de 95 m/min para 330 m/min, ocasionou um aumento no valor do coeficiente de atrito de 6,45%, e para o avanço de 0,25 mm/rot, essa mesma variação na velocidade ocasionou o aumento do coeficiente de atrito em 19,12%.

A Figura 10 apresenta uma visão geral dos valores de coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco, no torneamento do Aço Inox 304 em função das três condições de corte empregadas, a saber, corte a seco, corte com refrigeração por ar comprimido e por ar gelado. A variação geral do coeficiente de atrito neste caso ficou entre 0,36 (resultado obtido para o resfriamento por ar gelado e os parâmetros de corte de  $f = 0,05$  mm/rot e  $V_c = 330$  m/min) e 0,86 (resultado obtido para o corte a seco e corte com refrigeração por ar comprimido, nos parâmetros de corte de  $f = 0,25$  mm/rot e  $V_c = 330$  m/min). Percebe-se que o avanço teve influência mais significativa sobre o valor do coeficiente de atrito que a velocidade de corte.



**Figura 10.** Coeficiente de Atrito para o Aço Inox 304 em função da refrigeração e dos parâmetros de corte. (Fonte: Elaboração Própria)

Não houveram diferenças significativas nos valores de coeficiente de atrito entre o corte a seco e o corte com refrigeração para o Aço Inox 304. Neste caso, seria interessante se adicionar uma operação de refrigeração com lubrificante, uma vez que, segundo [11], uma lubrificação eficaz pode proporcionar uma diminuição no atrito entre o cavaco e a ferramenta no corte deste material. De acordo com Shukla, Dubey e Sharma [13], o uso da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) ofereceu melhores resultados em comparação ao corte a seco, nos experimentos de corte do Aço Inox 304 realizados pelos autores.

É possível observar que o Aço SAE 4340 e o Aço Inox 304 apresentaram comportamento semelhante para os três tipos de refrigeração. Para o corte a seco, ao se fixar o valor do avanço, ambos os aços apresentaram queda no coeficiente de atrito para os avanços de 0,05 e 0,12 mm/rot, e aumento para o avanço de 0,25 mm/rot, à medida que a velocidade de corte aumentava. Já para o corte com refrigeração, tanto por ar comprimido quanto por ar gelado, ambos os aços apresentaram queda no coeficiente de atrito para o avanço de 0,05 mm/rot, e aumento para os avanços de 0,12 e 0,25 mm/rot, à medida que a velocidade de corte aumentava.

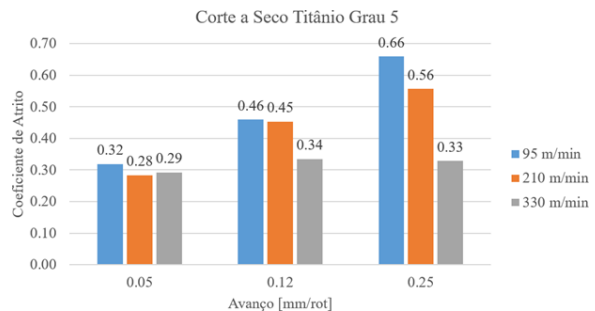
A diminuição do valor do coeficiente de atrito para o corte a seco, nos avanços de 0,05 e 0,12 mm/rot, à medida que a velocidade de corte aumentava, pode ser explicada pelo fato de esse aumento de velocidade proporcionar um aumento na temperatura diminuindo assim a dificuldade de corte [14]. Já no avanço de 0,25 mm/rot, o aumento da velocidade pode ter aumentado o coeficiente de atrito devido ao aumento da área de contato entre a ferramenta e a peça gerando um atrito maior [13].

### 3.3. Titânio Grau 5

A Figura 11 apresenta os valores do Coeficiente de Atrito para o Titânio Grau 5, em função da variação do avanço e da velocidade de corte, no corte a seco. Observa-se que, ao se fixar o valor da velocidade de corte, o aumento do avanço proporcionou um aumento significativo no valor do coeficiente de atrito para quase todas as velocidades, exceto para velocidade de 330 m/min, onde houve um comportamento aleatório.

Para todas as faixas de avanço o coeficiente de atrito foi maior para a baixa velocidade de corte. Ao se fixar o valor do avanço, pode-se perceber que para todas as faixas de avanço, o aumento da velocidade de 95 m/min para 330 m/min ocasionou uma queda no valor do coeficiente de atrito. Para o avanço de 0,05 mm/rot essa queda foi de 9,37% e para os avanços de 0,12 e 0,25 mm/rot, essa queda foi, respectivamente, 26,09% e 50%. Para o avanço de 0,05 mm/rot e velocidade de corte de 210 m/min, o valor do coeficiente de atrito apresentou um comportamento

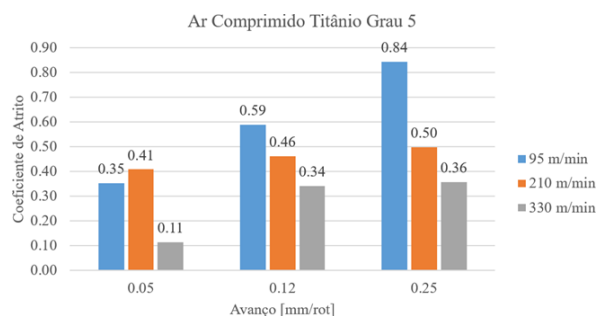
aleatório em comparação com as outras faixas de velocidade e avanço.



**Figura 11.** Coeficiente de Atrito para o Titânio Grau 5 no corte a seco. (Fonte: Elaboração Própria)

A Figura 12 apresenta os valores do Coeficiente de Atrito para o Titânio Grau 5, em função da variação do avanço e da velocidade de corte, no corte com refrigeração por ar comprimido. Observa-se que, ao se fixar o valor da velocidade de corte, o aumento do avanço proporcionou um aumento significativo no valor do coeficiente de atrito para todas as velocidades.

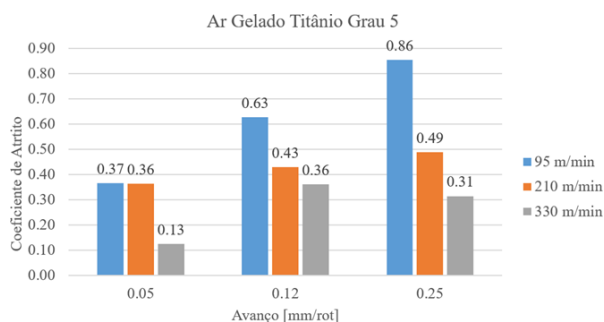
Para todas as faixas de avanço o coeficiente de atrito foi maior para a baixa velocidade de corte. Ao se fixar o valor do avanço, pode-se perceber que para todas as faixas de avanço, o aumento da velocidade de 95 m/min para 330 m/min ocasionou uma queda no valor do coeficiente de atrito. Para o avanço de 0,05 mm/rot essa queda foi de 68,57% e para os avanços de 0,12 e 0,25 mm/rot, essa queda foi, respectivamente, 42,37% e 57,14%. Para o avanço de 0,05 mm/rot e velocidade de corte de 210 m/min, o valor do coeficiente de atrito apresentou um comportamento aleatório em comparação com as outras faixas de velocidade e avanço.



**Figura 12.** Coeficiente de Atrito para o Titânio Grau 5 utilizando Ar comprimido como refrigeração. (Fonte: Elaboração Própria)

A Figura 13 apresenta os valores do Coeficiente de Atrito para o Titânio Grau 5, em função da variação do avanço e da velocidade de corte, no corte com refrigeração por ar gelado. Observa-se que, ao se fixar o valor da velocidade de corte, o aumento do avanço proporcionou um aumento significativo no valor do coeficiente de atrito para quase todas as velocidades, exceto para velocidade de 330 m/min, onde houve um

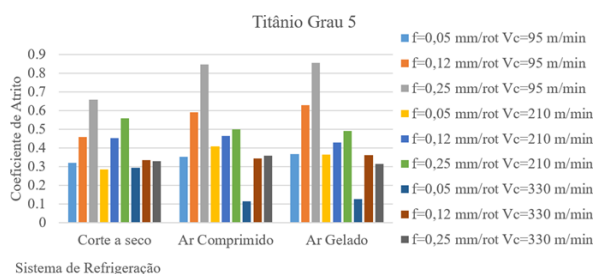
comportamento aleatório. Para todas as faixas de avanço o coeficiente de atrito foi maior para a baixa velocidade.



**Figura 13.** Coeficiente de Atrito para o Titânio Grau 5 utilizando Ar Gelado como refrigeração. (Fonte: Elaboração Própria)

Ao se fixar o valor do avanço, pode-se perceber que para todas as faixas de avanço, o aumento da velocidade ocasionou uma queda no valor do coeficiente de atrito. Para o avanço de 0,05 mm/rot essa queda foi de 64,86% e para os avanços de 0,12 e 0,25 mm/rot, essa queda foi, respectivamente, 42,86% e 63,95%.

A Figura 14 apresenta uma visão geral dos valores de coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco, no torneamento do Titânio grau 5 em função das três condições de corte empregadas, a saber, corte a seco, corte com refrigeração por ar comprimido e por ar gelado. A variação geral do coeficiente de atrito neste caso ficou entre 0,11 (resposta obtida para o resfriamento por ar comprimido e os parâmetros de corte de  $f = 0,05$  mm/rot e  $V_c = 330$  m/min) e 0,86 (resposta obtida para o corte com refrigeração por ar gelado e os parâmetros de corte de  $f = 0,25$  mm/rot e  $V_c = 95$  m/min). Percebe-se que o avanço teve influência mais significativa sobre o valor do coeficiente de atrito, mas para o caso do Titânio, a velocidade de corte teve mais influência nesse resultado que para os outros dois materiais estudados.



**Figura 14.** Coeficiente de Atrito para o Titânio Grau 5 em função da refrigeração e dos parâmetros de corte. (Fonte: Elaboração Própria)

Para a velocidade de 95 m/min, o uso de refrigeração por ar comprimido ocasionou um aumento no valor do coeficiente de atrito, e para o uso de refrigeração por ar gelado o aumento do atrito foi ainda maior. Isso pode ser explicado pelo fato de o uso de refrigeração gerar

possíveis aumentos na força de corte, devido ao aumento de resistência ao cisalhamento do material pela redução de temperatura, ocasionando assim um aumento no coeficiente de atrito [13].

Para a velocidade de 95 m/min, o uso de refrigeração causou um aumento do coeficiente de atrito para todas as faixas de avanço. Para a velocidade de 210 m/min, o uso de refrigeração por ar comprimido proporcionou um aumento no atrito comparado ao corte a seco, e com o uso de refrigeração por ar gelado houve uma pequena queda em relação ao ar comprimido. Já para a alta velocidade de corte, de 330 m/min, observou-se que, com o uso dos mecanismos de refrigeração, o valor do coeficiente de atrito diminuiu consideravelmente para o avanço de 0,05 mm/rot, não havendo diferenças significativas entre ar comprimido e ar gelado. Já para as outras duas faixas de avanço, a refrigeração não proporcionou grandes alterações no valor do coeficiente de atrito.

É interessante ressaltar que a medida que a velocidade aumentou no corte do Titânio, o valor do coeficiente de atrito diminuiu, sendo os menores valores encontrados nos experimentos conduzidos com velocidade de corte igual a 330 m/min. Em experimentos conduzidos com essa mesma liga, por Hong, Ding e Jeong [14], o mesmo aconteceu. Em todas as condições de teste propostas pelos autores, o coeficiente de atrito diminuiu à medida que a velocidade de corte aumentou.

Observando de maneira geral os gráficos para os três materiais estudados, percebe-se que os menores valores de coeficiente de atrito obtidos foram para a combinação dos seguintes parâmetros de corte, avanço de 0,05 mm/rot e velocidade de corte de 330 m/min, para condições de corte com algum tipo de refrigeração, a saber, ar comprimido para o Aço SAE 4340 e para o Titânio Grau 5, e ar gelado para o Aço Inox 304. Para todos os materiais e mecanismos de refrigeração, foi possível observar-se que o avanço foi o parâmetro cuja variação proporcionou a maior alteração no coeficiente de atrito. A medida que o valor do avanço aumentou, o coeficiente de atrito também aumentou. Todos os experimentos realizados demonstraram isso. Oraby e Alaskari [12] conduziram experimentos em aço que apresentaram resultados nos quais o avanço também era o parâmetro de maior influência no coeficiente de atrito, mas a relação apresentada era diferente no trabalho dos autores: à medida que o avanço aumentava, o coeficiente de atrito diminuía. Já Shukla, Dubey e Sharma [13], ao realizarem experimentos com Aço Inox 304, afirmaram que o aumento no avanço proporcionou um aumento na área de contato entre a ferramenta e a peça, o que aumentou o atrito e a força de corte.

#### 4. Conclusões

O objetivo principal desta pesquisa foi estudar o corte ortogonal em três materiais metálicos, o Aço 4340, o



Aço Inox 304 e o Titânio grau 5, através da realização de experimentos sem refrigeração (corte a seco) e com refrigeração por ar comprimido e também por ar gelado, com a variação da velocidade de corte e do avanço em três níveis.

Por meio dos resultados obtidos pode-se observar que o avanço foi o parâmetro de corte que apresentou maior influência nos valores de coeficiente de atrito para o corte ortogonal dos materiais estudados. Foi possível perceber também que as refrigerações por ar comprimido e por ar gelado apresentaram poucas diferenças entre si, sendo interessante que se mantenha apenas um dos dois mecanismos.

Para o aço 4340, a utilização de refrigeração colaborou para a diminuição do coeficiente de atrito. Para o aço Inox 304, a presença de refrigeração não proporcionou alterações significativas. Por outro lado, para o Titânio Grau 5, considerando as velocidades de 95 e 210 m/min, a presença de refrigeração ocasionou um aumento no valor do coeficiente de atrito, enquanto para a velocidade de 330 m/min, houve uma pequena diminuição deste ou não houve alterações significativas.

Em trabalhos futuros, sugere-se que sejam repensados os experimentos a fim de que os níveis de avanço estejam mais ajustados à faixa recomendada pelo fabricante das ferramentas. Além disso, sugere-se que os experimentos sejam realizados com réplicas e que seja realizada uma otimização estatística dos resultados para que seja possível a definição dos parâmetros mais otimizados para estas operações.

## 5. Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pelo apoio financeiro na realização desta pesquisa.

## 6. Referências

- [1] MORCEIRO, P. C. A indústria brasileira no limiar do século XXI: uma análise da sua evolução estrutural, comercial e tecnológica. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2018.
- [2] MACHADO, Á. R. et al. Teoria da usinagem dos materiais. Editora Blucher, 2009.
- [3] SONG, W. Development of predictive force models for classical orthogonal and oblique cutting and turning operations incorporating tool flank wear effects. [s.l.] Queensland University of Technology, 2006.
- [4] RAO, C. J.; RAO, D. N.; SRIHARI, P. Influence of cutting parameters on cutting force and surface finish in turning operation. *Procedia Engineering*. Anais...Elsevier Ltd, 2013.
- [5] MERCHANT, M. E. Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip. *Journal of Applied Physics*, v. 16, n. 5, p. 267–275, 1945.
- [6] SHAW, M. C. (MILTON C. Metal cutting principles. [s.l.] Oxford University Press, 2005.
- [7] DE JESUS, A. M. P. Fundamentos do Corte: Teoria e Exercícios. 1a ed. Porto: Universidade do Porto, 2019. v. 1
- [8] RAO, C. J.; RAO, D. N.; SRIHARI, P. Influence of cutting parameters on cutting force and surface finish in turning operation. *Procedia Engineering*. Anais...Elsevier Ltd, 2013.
- [9] TSEKHANOV, J.; STORCHAK, M. Development of analytical model for orthogonal cutting. *Production Engineering*, v. 9, n. 2, p. 247–255, 1 abr. 2015.
- [10] LIEW, P. J. et al. An overview of current status of cutting fluids and cooling techniques of turning hard steel. *International Journal of Heat and Mass Transfer* Elsevier Ltd, , 2017.
- [11] UYSAL, A.; JAWAHIR, I. S. Analysis of slip-line model for serrated chip formation in orthogonal machining of AISI 304 stainless steel under various cooling/lubricating conditions. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 67, p. 447–460, 1 jul. 2021.
- [12] ORABY, SAMY E., AND AYMAN M. ALASKARI. Mathematical modeling experimental approach of the friction on the tool-chip interface of multicoated carbide turning inserts. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering* 5.3 (2011): 633-643.
- [13] SHUKLA, A.; DUBEY, V.; KUMAR SHARMA, A. Comparative study of dry machining with MQL assisted soybean oil in turning operation of AISI 304 steel. *Materials Today: Proceedings*, 2023.
- [14] SUAREZ, M. P. Influência da texturização a laser em ferramentas de metal duro revestidas na usinagem do aço ABNT 1050. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2012.
- [15] HONG, S. Y.; DING, Y.; JEONG, W.-C. Friction and cutting forces in cryogenic machining of Ti–6Al–4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 41, n. 15, p. 2271–2285, 2001.