

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO – Engenharia Mecânica
Disciplina MEC041 - Trabalho Final de Graduação II

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE DIFERENTES FLUIDOS LUBRI-
REFRIGERANTES NO TORNEAMENTO DO AÇO ENDURECIDO AISI
4340**

Autor 1 – Geancarlos Fonini Lodi

155949@upf.br

Autor 2 – Dr. Luiz Airton Consalter

lac@upf.br

Comissão Examinadora – Dr. Charles Leonardo Israel, Dr. Wu Xiao Bing

RESUMO

O processo de torneamento é um dos principais processos de fabricação mais usuais na indústria atual, sendo caracterizado por apresentar a possibilidade de se obter bons acabamentos superficiais de forma mais econômica. O presente estudo busca analisar a influência da aplicação de diferentes fluidos lubri-refrigerantes aplicados a jorro e MQL, além do corte a seco no torneamento do aço AISI 4340 endurecido, no objetivo de definir a viabilidade do uso de fluido de corte para esta usinagem, juntamente definindo quais parâmetros de corte se mostram influentes sobre a rugosidade e a força. Os resultados quantitativos foram analisados através do procedimento estatístico “Design Of Experiments” (DOE), utilizando o *software* Minitab para criar gráficos de resposta, e os resultados qualitativos foram alcançados através da análise da rugosidade “Ra” e da força “Fc”. Concluiu-se que o corte a seco se sobressaiu melhor em relação a aplicação dos fluidos, a respeito dos parâmetros, a velocidade de corte não apresentou grande influência, e o avanço se destacou positivamente quando $f=0,05$ mm/rot.

Palavras chave: rugosidade, força de usinagem, parâmetros de corte, fluidos.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de fluidos de corte nos processos de usinagem pode-se tornar uma incógnita na hora de fabricar determinado componente, diante disso, a necessidade de implementação de um sistema de lubri-refrigeração é uma questão muito relevante e comumente abordada, onde deve ser metodicamente analisado, podendo acarretar em prós e contras dentro da fabricação.

Ainda a respeito dos fluidos e sua forma de uso, a aplicação de técnicas como MQL aliada ao uso de fluidos de base vegetal pode ser considerada uma técnica sustentável, tendo em vista a sua utilização em baixíssimas vazões (MAHADI *et al.*, 2019). Não menos importante, a aplicação a jorro também é uma técnica muito explorada, ao contrário do MQL, o mesmo é trabalhado em altas vazões, onde sua desvantagem sustentável e econômica é exatamente esta, mas por outro lado, pode ser destacado a sua utilização com emprego de fluidos com maior potencial biodegradável, a fins de não prejudicar o meio ambiente e a saúde do operador.

O uso ou não de fluidos de corte na usinagem de materiais endurecidos pode ser considerado um fator significativo no resultado final das peças usinadas. Leva-se em conta que a usinagem de aços endurecidos pode ser realizada a seco (sem uso de fluido), portanto, a utilização dos mesmos deve ser previamente analisada, levando como base o processo, material da peça e ferramenta utilizada, a fim de se obter mediante isso um melhor acabamento superficial com significativa minimização das forças de usinagem, garantindo melhores condições de corte.

Visando a busca por melhor produtividade, e considerando aspectos econômicos e sustentáveis aliados a seleção correta dos parâmetros de corte, pode-se obter no processo de

torneamento de acabamento de aços endurecidos resultados compatíveis ou até superiores de produtividade e qualidade, gerando melhor custo x benefício quando comprado ao processo de retificação (LIMA; CORRÊA, 2002).

A respeito dos parâmetros de usinagem, os mesmos devem estar aliados de forma correta em relação ao material da peça, tipo de operação e ferramenta, a fim de executar o torneamento de forma eficiente e otimizada.

Este estudo busca evidenciar a utilização de fluidos lubri-refrigerantes aplicados a jorro e MQL no processo de torneamento de aço endurecido, tendo sua seleção justificada por ser um material amplamente utilizado na indústria aeronáutica. Contudo, analisando a influência que os parâmetros de usinagem (V_c e f) e os diferentes fluidos juntamente com o corte a seco, exercem na rugosidade e na força de usinagem.

1.1 Objetivo Geral

Verificar experimentalmente o desempenho de diferentes fluidos de cortes aplicados a jorro e em MQL no torneamento do aço AISI 4340 endurecido, com foco na sustentabilidade, buscando resultados que sejam satisfatórios a ponto de utilizar fluidos biodegradáveis tanto em baixas ou altas vazões, ou até mesmo a não utilização de fluidos de corte para essa usinagem.

1.2 Objetivos Específicos

- Analisar os efeitos de diferentes fluidos lubri-refrigerantes sobre a rugosidade e a força de usinagem em diferentes condições de velocidade de corte e avanço.
- Comparar diferenças de desempenho com corte sem fluido (a seco) e com aplicação em MQL e a jorro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversos assuntos e trabalhos realizados são relevantes e contribuem para o entendimento deste artigo, e os principais estão apresentados a seguir.

2.1 Aços endurecidos

2.1.1 Torneamento dos aços endurecidos

A definição de torneamento de aços endurecidos é aplicada a peças que apresentam dureza acima de 45 HRC. Uma vantagem que pode ser destacada no torneamento dos aços endurecidos é a possibilidade da não utilização de fluidos de corte (BAG *et al.*, 2019). O torneamento de aços com alta dureza tem se destacado cada vez mais no ramo industrial, devido a otimização do tempo e custos de produção (LIMA; CORRÊA, 2002).

A escolha de ferramentas e das condições de corte, são um fator importante no torneamento de materiais endurecidos, pois devido a dureza do material e o atrito da peça com a ferramenta, altas temperaturas são geradas. As ferramentas mais adequadas a usinar materiais duros são as de cerâmica, PCBN e a classe H de metal duro. Em relação aos parâmetros do processo, o mais indicado na usinagem desse tipo de material é trabalhar com altas velocidades de corte e valor de avanço e profundidade de corte relativamente baixos. (MACHADO *et al.*, 2009).

De acordo com Ferraresi (1977) alguns fatores influenciam sobre a usinabilidade em função do material da peça, são eles: composição química, microestrutura, dureza e propriedades de tensões.

Anand, Behera e Das (2019) citam os principais fatores que influenciam o desempenho do torneamento de aços endurecidos e salientam que, durante a usinagem de materiais duros é necessário que haja uma boa rigidez entre máquina e ferramenta. O aumento de temperatura na zona de corte é muito significativo na usinagem de peças duras, com isso as ferramentas de

cerâmicas, CBN e metal duro revestido apresentam um bom desempenho na usinagem desses materiais. Em relação ao método de lubri-refrigeração aplicado a aços endurecidos, destaca-se que a utilização pode melhorar a qualidade do processo e substancialmente a vida da ferramenta. Por fim os autores destacam que o processo de acabamento no torneamento duro quando comparado ao de retificação pode apresentar vantagens econômicas, devido a maior produção em menor tempo e resultados compatíveis em determinados casos.

Aslan, Camuscu e Birgören (2007) realizaram um experimento no torneamento do aço AISI 4140 endurecido a 63 HRC utilizando ferramenta de cerâmica mista, no objetivo de definir os melhores parâmetros de (v_c , f , a_p) para essa configuração de corte, também analisando o desempenho do acabamento superficial. Os autores concluíram que a rugosidade superficial, uma velocidade de corte alta, profundidade de corte baixa (0,25 mm) e avanço médio (0,10 mm/rev), se mostram com melhor desempenho.

Em seu trabalho Matsumoto (1998) procurou avaliar a possibilidade da substituição do processo de retificação pelo processo de torneamento em condições a seco para fins de melhor acabamento superficial. Para isso, as ferramentas utilizadas foram a de PCBN e cerâmica mista na usinagem do aço ABNT 52100 com dureza de 60 HRC. A rugosidade obtida foi de $R_a = 0,6 \mu\text{m}$ e assim concluiu afirmando que é possível obter uma rugosidade satisfatória da mesma forma que no processo de retificação, a ferramenta de cerâmica se apresentou mais eficaz em relação ao acabamento superficial, e a velocidade de corte e ângulo de posição de gume da ferramenta de 90° e 75° foram fatores que não tiveram influência.

2.2 Aço AISI 4340

O aço AISI 4340 é amplamente usado na fabricação de componentes mecânicos que requer uma boa dureza ao longo da seção transversal. Aplicado na fabricação de materiais que exigem elevada resistência por serem submetidos a esforços recorrentes, sendo assim, caracteriza-se por apresentar boa resistência mecânica e também uma boa resistência a fratura e a fadiga, utilizado em projetos onde deseja-se uma combinação destes três fatores (METALS, 2020).

A aplicação fabril desse aço caracteriza-se na utilização de componentes que necessitam alta resistência, sendo aplicado em engrenagens, eixos de transmissão, trens de pouso de aeronaves, entre outros (AZOMATERIALS, 2012).

Conforme pode ser visto na Tabela 1, é apresentado os elementos que compõem a estrutura do aço AISI 4340, respectivamente com a porcentagem da sua composição química.

Elemento	Composição (%)
Ferro (Fe)	95,195 - 96,33
Níquel (Ni)	1,65 - 2,00
Cromo (Cr)	0,700 - 0,900
Manganês (Mn)	0,600 - 0,800
Carbono (C)	0,370 - 0,430
Molibdênio (Mo)	0,200 - 0,300
Silício (Si)	0,150 - 0,300
Enxofre (S)	0,0400
Fósforo (P)	0,0350

Tabela 1 – Composição química do aço AISI 4340
Fonte: Adaptado de Azomaterials (2012)

A adição de elementos de liga na estrutura dos aços pode melhorar substancialmente algumas propriedades, a Tabela 2 ilustra a função que cada elemento pode desempenhar para esta melhora.

Influência dos elementos químicos nos aços											
Propriedades	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Al	W
Dureza	X	X	X		X						X
Resistência Mecânica	X	X	X		X				X		X
Ductibilidade	X		X	X							
Soldabilidade	X										
Desoxidação		X			X					X	
Tenacidade						X					
Resistência a corrosão							X				
Temperabilidade							X	X			
Resistência a abrasão							X				
Resistência a alta temperatura								X			
Formação de carbonetos	X					X	X	X	X		X

Tabela 2 – Influência dos elementos de liga nas propriedades dos aços
 Fonte: Adaptado de Serrametal (2020)

2.3 Forças de usinagem

É fundamental o conhecimento dos efeitos das forças de usinagem, pois são responsáveis por vibrações ocorridas no processo, e também por exercerem influência nas deflexões da ferramenta afetando o acabamento final da peça. Com isso é necessário controlar as forças geradas, em conjunto com os parâmetros com a finalidade de garantir uma maior rigidez durante a operação de usinagem (SOUZA, 2011).

Segundo Machado *et al.* (2009) os três principais componentes das forças de usinagem são (Figura 1):

- Força de corte ou força principal de corte (F_c): é definida pela projeção da força do processo de usinagem sobre o seu plano de trabalho, na direção de corte, que é dada pela velocidade de corte.
- Força de avanço (F_f): é a projeção da força de usinagem sobre seu plano de trabalho, na direção de avanço, dada pela velocidade de avanço.
- Força passiva ou força de profundidade (F_p): é determinada pela projeção de sua força de usinagem, sendo perpendicular ao plano de trabalho.

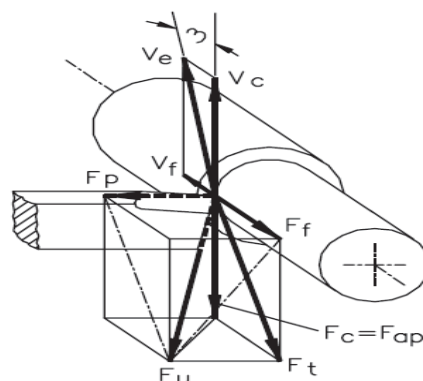


Figura 1 – Principais componentes das forças de usinagem exercidas no processo de torneamento cilíndrico externo

Fonte: Machado *et al.* (2009)

Sobre os fatores que influenciam as forças de usinagem, Machado *et al.* (2009) discorre que, a interface ferramenta/cavaco tem influência significativa na força de usinagem. Os fatores que ajudam a facilitar o deslizamento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta, atuam de forma a diminuir a força de usinagem. Contudo, a força de usinagem também pode variar de acordo com a resistência mecânica do material.

Suresh *et al.* (2012) realizou um estudo da usinabilidade do aço AISI 4340 endurecido, com o intuito de analisar a influência que os parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) exercem nas forças de usinagem. Com a conclusão dos testes, foi possível identificar que quando os parâmetros de avanço, profundidade de corte e tempo de usinagem foram baixos aliado a uma velocidade de corte alta é uma combinação boa para reduzir as forças. Com isso as forças no processo são mais sensíveis para a taxa de avanço.

A utilização de um fluido de corte durante o processo de torneamento, implica diretamente na alteração da pressão específica de corte (K_s) minimizando o atrito entre ferramenta-cavaco gerando uma diminuição de K_s . Então quanto melhor for a lubrificação na área de corte (maior penetração do fluido), menor será o K_s (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). A ação do fluido lubrificando a peça usinada deve ser maior que a refrigeração, pois com o aumento da lubrificação as forças diminuem, já com o aumento da refrigeração as forças tendem a aumentar pelo fato de que a diminuição de temperatura afeta a resistência ao cisalhamento (SANTOS; SALES, 2007).

Em seu trabalho Borba (2016), buscou analisar as forças de usinagem no torneamento de três tipos de aços endurecidos diferentes (AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2). As ferramentas utilizadas foram de PCBN e metal duro. Com base nas análises realizadas pode concluir que as forças de usinagem dependeram diretamente da influência da microestrutura do aço usinado, observou-se também que para a usinagem do aço 4340 as forças de usinagem foram menores do que os outros aços analisados, isso foi possível por influência da ausência de carbonetos em sua microestrutura. No que diz respeito a forma geométrica da ferramenta, independentemente do tipo de aço usinado, a ferramenta de PCBN se caracterizou por apresentar maior intensidade de força do que a de metal duro, devido influência do ângulo de saída. Contudo ressaltou que mesmo apresentando menores forças, a ferramenta de metal duro não suportou condições mais “pesadas” durante o processo, que foi na usinagem onde os três tipos de aços estavam com uma dureza superior a 55 HRC.

Pal, Choudhury e Chinchankar (2014) realizaram um experimento avaliando as forças de usinagem do aço AISI 4340 endurecido, durante o processo de torneamento. Foram analisados três níveis de dureza diferente (35, 45 e 55 HRC), com a utilização da ferramenta de cerâmica mista e os parâmetros de avanço e profundidade de corte fixados em ($f=0,113\text{mm/rev}$; $a_p=0,3\text{mm}$). Os autores concluíram que em relação a velocidade de corte, as forças, tangencial, radial e axial, diminuíram com o seu aumento. Justificando que isso se deve ao fato do crescimento de energia no plano de cisalhamento, com isso ocorrendo o aumento do atrito, juntamente com o aumento da temperatura, tornando o material menos resistente ao corte.

2.4 Rugosidade superficial

A rugosidade é um parâmetro mensurado para identificar a qualidade de uma superfície usinada, sendo composta por desvios aleatórios. Por mais lisa que seja a superfície e independente do processo que foi usinado, ela nunca será totalmente isenta de imperfeições. Com base na necessidade do projeto, essas imperfeições devem ser planejadas de modo que podem ser minimizadas (KOPAC; BAHOR, 1999).

Em relação aos parâmetros de corte, Santos e Sales (2007) enfatizam que o avanço e profundidade de corte são os fatores que mais influenciam na integridade superficial das peças. Em relação a velocidade de corte esse fator não é tão influente quanto avanço e profundidade, mas trabalhar com velocidades mais altas é o mais indicado, pois em baixas velocidades as forças de usinagem são maiores e assim mais suscetível a formação de aresta postiça de corte (APC). Considerando a aplicação de fluido de corte, a diminuição da rugosidade é evidente em alguns

casos, agindo como lubrificante minimizando o atrito e como refrigerante minimizando a temperatura.

Sobre a rugosidade superficial, é caracterizada por ondulações e falhas que devem ser evitadas durante a fabricação. Uma rugosidade que apresenta baixos valores, é essencial em superfícies de mancais, superfícies que podem servir de escoamento de fluidos, entre outros. Para superfícies que irá se trabalhar com lubrificação deve-se possuir uma rugosidade característica, como por exemplo paredes de cilindros de motores (MACHADO et al., 2015).

A rugosidade Ra é um parâmetro de análise muito controlado no processo de torneamento, quando há necessidade de garantir a qualidade final na fabricação de certos componentes que requerem um melhor acabamento superficial. Portanto, para este trabalho será avaliado somente o padrão Ra, que se destaca por ser mais usual.

Conforme Ferraresi (1977), alguns principais fatores que podem influenciar na rugosidade superficial:

- Avanço e raio de ponta da ferramenta
- Velocidade de corte
- Geometria da ferramenta
- Processo de usinagem utilizado
- Vibrações
- Fluido de corte

Com o objetivo de avaliar a integridade superficial no corte a seco de um aço endurecido, Davin e Figueira (2007), realizaram a usinagem de um aço endurecido com dureza de 60 HRC com ferramenta de cerâmica mista (70% Al₂O₃) e (30% TiC). Os autores concluíram que a rugosidade superficial foi um fator amplamente dependente do avanço juntamente com a evolução do desgaste da ferramenta.

2.5 Fluidos de corte lubri-refrigerantes

2.5.1 Funções dos fluidos de corte

Durante a usinagem se desenvolve uma grande quantidade de calor devido ao atrito gerado entre a ferramenta-peça e cavaco-ferramenta, com isso é necessário reduzir o máximo possível desse calor para evitar um maior desgaste da ferramenta e também a alteração da microestrutura da peça. Portanto a aplicação de fluidos de corte no processo de usinagem além da contribuição de uma diminuição de temperatura, diminui substancialmente os esforços e potências de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

“Os principais fatores de escolha do fluido adequado são o material da peça, a severidade da operação (condições de usinagem), o material da ferramenta e a operação de usinagem.” (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014, p. 171).

De acordo com Machado *et al.* (2009) o fluido de corte deve ser aplicado o mais próximo possível da aresta cortante, de forma que consiga penetrar entre a ferramenta e cavaco para que exerça melhor a sua função.

Conforme Ferraresi (1977), os fluidos de corte têm como funções:

- Diminuir o coeficiente de atrito entre ferramenta e cavaco
- Reduzir as forças e potências de usinagem
- Melhorar o acabamento da peça
- Auxilia na remoção de cavacos na área de corte
- Refrigeração da peça e da ferramenta

2.5.2 Modos de aplicação dos fluidos de corte

Conforme salienta Souza (2011), em relação a direção de aplicação do fluido de corte não há um consenso sobre a sua melhor eficácia, contudo ilustra (Figura 2) as direções possíveis de aplicações.

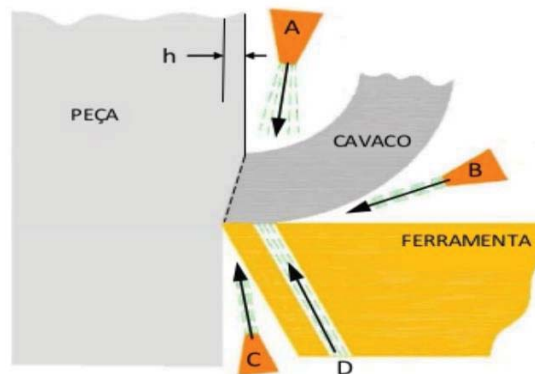


Figura 2 – Possíveis direções (A, B, C e D) de aplicação do fluido de corte

Fonte: Souza (2011)

Em relação a aplicação dos fluidos em baixas velocidades de corte, o fluido assume o papel de lubrificante, portanto com velocidades baixas o fator de refrigeração acaba não sendo de maior necessidade. Já em um processo que necessita maior velocidade de corte, no caso de o material apresentar maior dureza, a relação é o inverso, e o resfriamento se torna o fator mais importante pois as condições em velocidades maiores são desfavoráveis a penetração do fluido na interface cavaco/ferramenta (SALES; DINIZ; MACHADO, 2001).

Para a usinagem onde será utilizado uma ferramenta de cerâmica o uso de fluidos de corte deve ser bem planejado, pois por se tratar de uma ferramenta com alta dureza e fragilidade ao choque térmico no momento em que o fluido entrar em contato com a ferramenta em alta temperatura pode ocasionar em trincas e quebras (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). Já as ferramentas que são a base de diamante e PCBN são mais suscetíveis a suportar choques térmicos, com isso o fluido de corte não altera a vida da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2009).

A aplicação de fluido de corte durante o torneamento se faz necessário em alguns casos, por exemplo, quando se utiliza ferramentas com baixa resistência e velocidades de corte alta, pois o calor gerado é capaz de diminuir a resistência da ferramenta ocasionando em falhas. Além da ferramenta, a utilização de fluido de corte também é benéfica quando se deseja obter um bom acabamento superficial e com tolerância apertadas (SALES; DINIZ; MACHADO, 2001).

2.5.3 Classificação dos fluidos

Com base em Sales, Diniz e Machado (2001), a classificação dos fluidos de corte não segue uma padronização, assim podem ser classificados por três grupos principais:

- Ar
- Fluido de corte a base de água (soluções aquosas, emulsão)
- Óleos (minerais, graxos e compostos)

2.5.4 Impactos ambientais

Gajrani e Sankar (2017) estimam que o óleo de base vegetal pode ser o “novo futuro” nesta área de fluidos lubrificantes, pois com sua utilização em comparação a fluidos minerais, gera maior preservação da saúde do operador e contribuiu para uma usinagem mais sustentável. Além destes fatores vitais, apresentam boas propriedades, resistindo a altas temperaturas e pressões.

Fluidos de corte são muito utilizados em processos de usinagem com objetivo de lubrificar e refrigerar a superfície usinada, sua forma de utilização errada ou seu descarte incorreto acarretam em sérios problemas ambientais. Com base nisso, surgem formas de usinagem sustentável associadas a utilização dos fluidos de corte, sendo elas a aplicação de óleos com base vegetal e óleos com maior potencial biodegradável (CHETAN; GHOSH; RAO, 2015).

A substituição do óleo mineral por óleo vegetal, pode garantir um melhor cenário sustentável mediante sua baixa toxicidade, os óleos vegetais são em média cinco vezes mais degradáveis do que os óleos derivados do petróleo (CORDEIRO *et al.*, 2020). Também contribuem para a diminuição de custos de usinagem, conseqüentemente aumentando a produtividade do processo (TAZEHKANDI; SHABGARD; PILEHVARIAN, 2015).

Khan e Dhar (2006) citam algumas propriedades dos óleos vegetais quando aplicados na usinagem, são elas: filme de óleo de boa espessura garantindo boa adsorção, redução da temperatura e atrito na zona de corte, óleo biodegradável garantindo menor agressão ao meio ambiente.

2.5.5 Aplicação da técnica MQL, Jorro e Corte a Seco

Em relação a técnica MQL Sales, Diniz e Machado (2001, p. 237) afirmam que: “Esta técnica consiste na mistura de gotas de fluidos de corte (óleos puros ou emulsões) em um fluxo de ar comprimido, gerando um “spray” que é direcionado para a região de corte para funcionar como lubrificante e refrigerante”.

A aplicação de MQL é principalmente composto por dois sistemas de entrega (spray e ferramenta): o método por spray é o mais utilizado e funciona de modo que um reservatório contendo o fluido é conectado ao(s) bico(s) de pulverização. Já no método através da ferramenta o óleo e o ar são misturados externamente e canalizados diante do fuso da ferramenta, diretamente na região de corte (BOUBEKRI; SHAIKH, 2012).

A técnica mais utilizada de refrigeração durante o processo de usinagem é a de jorro, em que um grande volume de fluido é despejado na região de corte, inundando a integralmente a zona de corte (ALVES; OLIVEIRA, 2007). Boswell *et al.* (2017) através de pesquisas disponíveis na literatura, concluíram que a utilização de MQL no torneamento de aços endurecidos tem capacidade de melhorar algumas condições do processo, sendo elas, forças de usinagem, acabamento superficial e desgaste da ferramenta. Além disso, sua aplicação melhora a produção e os custos operacionais com a diminuição no uso em excesso de fluidos de corte.

Quando o torneamento rígido em condição a seco é executado, um fator importante a ser considerado é a vibração que é causada na ferramenta durante o processo. Diante deste problema, a implementação de um sistema de lubri-refrigeração pode ser favorável para uma melhora dessa vibração, com isso o fluido é aplicado diretamente na zona de corte (PAUL; VARADARAJAN; GNANADURAI, 2016).

Com embasamento teórico Lawal, Choudhury e Nukman (2013) enfatizam que aplicação de lubrificante a base de óleo vegetal além de favorecer o meio ambiente e diminuir os custos com fluidos, podem gerar bons resultados operacionais. Mas ressaltam que os resultados são dependentes do processo, material da peça, ferramenta e parâmetros de corte.

Kumar, Singh e Kalsi (2017) investigaram a influência dos parâmetros velocidade de corte e avanço, juntamente com a aplicação da técnica MQL em comparação a usinagem a seco e inundação, no acabamento superficial no torneamento do aço endurecido AISI 4340. Os autores concluíram que com o aumento do avanço influi diretamente no aumento da rugosidade, e justificaram que esse crescimento ocorre em razão de que, com o aumento do avanço a temperatura aumenta, com isso o desgaste da ferramenta é maior interferindo na qualidade final da peça.

Das *et al.* (2018) realizaram um estudo onde compararam o torneamento do aço AISI 4340 endurecido em relação a rugosidade superficial a taxa de avanço interfere diretamente, e a velocidade de corte não foi um fator influente.

Os autores Tazehkandi, Shabgard e Pilehvarian (2015) investigaram a usinagem do aço iconel 706 endurecido visando a sustentabilidade, com isso, o fluido de corte utilizado foi o óleo

de base vegetal biodegradável e a aplicação se deu por spray com ar comprimido e por inundação (Jorro). Esta forma de aplicação pode contribuir para diminuição dos danos ambientais causados pelos fluidos de corte, também aumentando a produção e diminuindo os custos de usinagem. Os parâmetros analisados foram rugosidade superficial e forças de usinagem. Foi possível definir que o modo de aplicação por spray com ar comprimido apresentou resultados melhores de rugosidade e força de usinagem quando comparado a técnica de inundação. Quando a velocidade de corte foi aumentada, o método de aplicação por spray se mostrou novamente mais vantajoso em relação a inundação, devido ao fato de que a rugosidade e as forças diminuíram, com isso se permite trabalhar com velocidades de corte mais altas garantindo uma melhor produtividade.

Gunjal e Patil (2018) realizaram um estudo no intuito de comparar o processo de torneamento do aço AISI 4340 endurecido utilizando como fluido de corte os óleos de base vegetal (canola, soja e coco) e óleo sintético em MQL. Os parâmetros de avanço e profundidade de corte foram mantidos constantes durante todos os testes. Com isso a velocidade de corte se torna um fator que não altera significativamente a rugosidade superficial. Em relação aos fluidos de corte, a utilização de óleo sintético foi o que obteve melhor acabamento superficial.

A comparação entre óleos minerais e óleos de base vegetal vem se tornando comum na usinagem. Elewab *et al.* (2020) analisaram a usinagem de um aço macio com intuito de comparar a utilização de óleos vegetais em relação ao óleo mineral e usinagem a seco. Os parâmetros analisados foram rugosidade e forças de corte. Os autores concluíram que a utilização de óleo vegetal se caracterizou por apresentar menores valores de rugosidade e forças de usinagem quando comparado a seco e ao óleo mineral. Os parâmetros que obtiveram melhores resultados foram definidos em $f= 0,08\text{mm/rev}$; $a_p= 1\text{mm}$.

Soares (2016), realizou um estudo, onde comparou a influência dos parâmetros de usinagem (V_c e f) com a aplicação de fluido de corte a Jorro e em MQL e também o torneamento a seco do aço AISI 4340, buscando avaliar o comportamento da rugosidade e da força de corte. Em relação aos parâmetros, concluiu que o avanço foi o principal influente sobre a rugosidade superficial, e a utilização de fluido de corte independentemente da forma de aplicação, não trouxe benefícios de forma significativa. No que se refere a força, o uso de fluido de corte atua de forma desprezível, não contribuindo para a minimização da mesma.

Carvalho (2012), analisou a influência da aplicação do fluido de corte em comparação ao corte a seco na usinagem do aço AISI 4340, na finalidade de observar o acabamento superficial (rugosidade R_a). Com isso, salientou que a rugosidade “ R_a ” foi menor em alguns pontos de medição quando não se fez a utilização de fluido de corte, portanto, definindo que o uso de fluido de corte não influencia esta usinagem de forma significativa.

Conforme salienta Machado et al., (2011), o aumento do avanço no processo de torneamento acaba causando marcas por toda peça em decorrência da ferramenta e do seu raio de ponta, portanto, quando f aumenta maior será o espaçamento deixado pelas marcas de avanço (sulcos) e com isso favorecendo o aumento da rugosidade superficial, ocasionando em uma perda de acabamento.

As pesquisas, artigos e resultados apresentados neste capítulo, com base nos mais diversos autores e áreas do conhecimento científico, foram de grande importância para o entendimento da física envolvida no processo de torneamento endurecido em relação a utilização e modo de aplicação dos fluidos lubri-refrigerantes, sua importância industrial, seu campo de atuação e suas limitações, que foram de grande importância para explorar os objetivos propostos por este artigo.

3 METODOLOGIA

Esta seção constitui na apresentação do planejamento experimental para a realização dos ensaios no processo de torneamento do aço AISI 4340 endurecido. Todos os experimentos foram realizados no Núcleo de Tecnologia Mecânica da Universidade de Passo Fundo.

O procedimento experimental é apresentado no fluxograma da Figura 3.

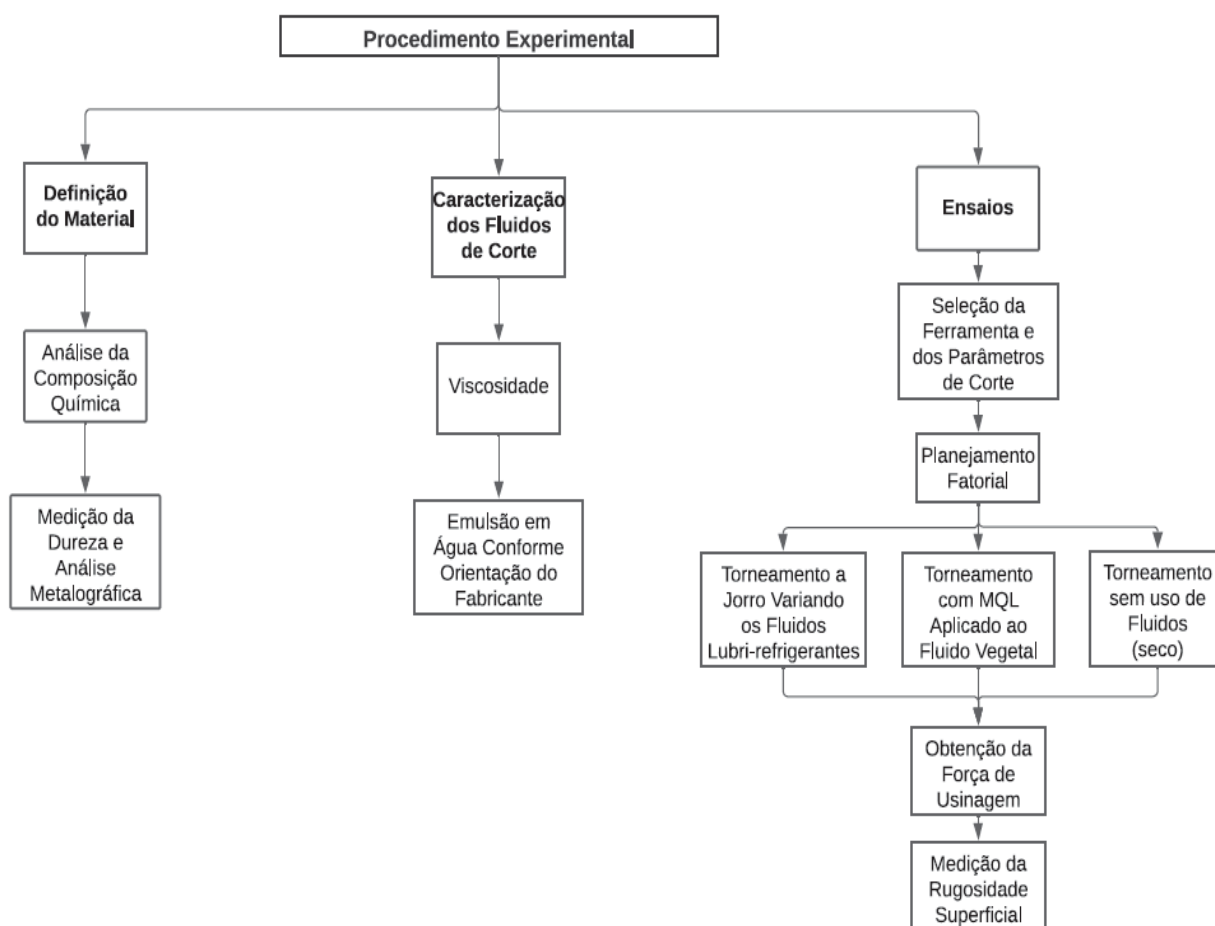


Figura 3 – Fluxograma de Trabalho
 Fonte: Autor (2021)

3.1 Parâmetros o processo

A seleção correta dos parâmetros de usinagem é essencial para um torneamento satisfatório, portanto, para este trabalho foram analisados a variação dos parâmetros de velocidade de corte (V_c) e avanço (f). A profundidade de corte (a_p) por se tratar de um processo de acabamento, foi mantido como um parâmetro fixo, portanto, será o mesmo durante todos os ensaios. Os critérios utilizados para a seleção dos parâmetros de corte foram: tipo do material usinado, ferramenta de corte e faixas de valores comumente utilizadas industrialmente para a usinagem de aços endurecidos. A tabela 3 representa os valores selecionados para cada nível.

Em relação ao material, o aço AISI 4340 endurecido sendo sua seleção devido a ser um material onde é possível usinar tanto a seco, quanto utilizando fluidos de corte, também levando em consideração a sua vasta aplicação no setor aeronáutico e automobilístico.

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Níveis		
			Baixo	Médio	Alto
Velocidade de Corte	V_c	m/min	100	125	150
Avanço	f	mm/rot	0,05	0,1	0,15
Profundidade de Corte	a_p	mm	0,5	0,5	0,5

Tabela 3 – Parâmetros de corte e seus respectivos níveis
 Fonte: Autor (2021)

3.2 Fluidos lubri-refrigerantes

Para a seleção dos fluidos de corte, o principal critério levado em consideração é o fator sustentabilidade, tendo em vista que a maior parte das indústrias passaram a adotar fluidos de origem biodegradável para suas usinagens. Portanto, os fluidos utilizados são caracterizados abaixo:

Fluido S40: é um fluido biodegradável isento de óleos, fabricado pela empresa Bondmann e deve ser diluído em uma proporção de 1:10 de água conforme recomendação do fabricante.

Fluido ME-1: é um óleo solúvel semissintético, fabricado pela empresa Quimatic Tapmatic. Apesar de ser um óleo considerado ecológico, em sua composição possui óleo mineral e metais pesados. Conforme recomendação do fabricante este fluido deve ser diluído em uma proporção de 1:9 de água para usinagem pesada.

Fluido Óleo de soja: o óleo de soja de base vegetal que será utilizado é da marca Primor. É empregado largamente na indústria alimentícia, porém algumas pesquisas vêm sendo realizadas com a utilização de fluidos de base vegetal na usinagem, sendo um fluido de boa biodegradabilidade.

A viscosidade de cada fluido, juntamente com a taxa de cisalhamento e tensão de cisalhamento pode ser vista na Tabela 4. Os fluidos S40 e ME-1 já foram analisados com sua mistura pronta (emulsão em água).

Fluido	Temperatura (°C)	Taxa de cisalhamento (1/s)	Tensão de cisalhamento (Pa)	Viscosidade (cP)
S40	16,7	80	6,703	83,79
ME-1	19,8	80	5,109	63,87
Óleo de soja	18	56	3,998	71,4

Tabela 4 – Caracterização dos fluidos

Fonte: Autor (2021)

Analisando os dados da Tabela 4, é possível visualizar que a maior viscosidade obtida foi apresentada pelo fluido S40, caracterizado por não apresentar óleo em sua composição, sendo seguido pelo óleo de soja e pelo fluido ME-1.

Para determinação dos valores de viscosidade dos fluidos apresentados na Tabela 4, foi utilizado um viscosímetro Brookfield modelo DV2T. A rotação nas três análises foi de 200 RPM com spindle 18 para os fluidos S40 e ME-1 e spindle 34 para o óleo de soja, registrando um tempo de medição de 30 segundos.

3.3 Metodologia experimental

O ponto principal deste estudo foi avaliar o comportamento da rugosidade superficial “Ra” e da força principal de corte “Fc”, em relação a utilização de três tipos de fluidos de corte aplicados a jorro (fluido isento de óleos a base de água, óleo semissintético a base de água e óleo de base vegetal comestível), além da utilização em MQL somente do fluido vegetal, aliado a aplicação sem o uso de fluidos (corte a seco) no torneamento do aço AISI 4340 endurecido.

Os parâmetros determinados simulam faixas de valores com cenários diferentes, sendo possível determinar uma melhor combinação dos mesmos para a usinagem deste aço. Para aliar as diferentes combinações dos parâmetros foi utilizado o software estatístico MINITAB através da metodologia DOE (*Design of experiments*), aliado a um planejamento fatorial completo 2^k , contendo duas réplicas no ponto central totalizando 30 ensaios. Os parâmetros analisados foram (Vc e f) para as três condições de fluidos aplicados a jorro e mais a utilização em MQL do óleo vegetal, e corte a seco.

Para um planejamento onde vários fatores são importantes ou dependentes um de outro, o experimento fatorial 2^k é utilizado. Consistindo na formulação de todas as combinações de níveis possíveis para serem analisados em conjunto. A utilização de réplicas no ponto central é importante nesse tipo de planejamento, pois diminui possíveis avarias no resultado (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

Segundo Montgomery (2018) no planejamento de um experimento é possível analisar como algumas variáveis afetam negativamente e positivamente o processo. Uma conclusão experimental pode determinar algumas melhoras sendo de produtividade, tempo e rendimento.

Um fator importante que deve ser levado em conta, é a aleatoriedade do experimento. Por mais que o experimento seja controlado baseando-se pelos seus parâmetros, há fatores que não são considerados que podem vir a afetar os resultados, e podem ser definidos como erro ou ruído.

3.4 Ensaios de usinagem

Todos os ensaios foram realizados nos laboratórios da Universidade de Passo fundo.

O material que foi usinado é o aço AISI 4340, que contém uma dureza de aproximadamente 52 HRC, para isso foi utilizado um torno marca Romi modelo ES 40A, com potência máxima de 15 CV (11 kW), e rotação máxima de 1700 rpm.

Para usinar este aço foi selecionado uma ferramenta de modo que suportasse uma situação severa de corte devido à alta dureza contida pelo material, portanto, foi utilizado ferramentas intercambiáveis de cerâmica mista (70% de Al_2O_3 + 30% de TiC), ISO CNGA 120408 S 01525 6050, recobertas com uma camada de nitreto de titânio (TiN), com microgeometria de gume “S” chanfrado e arredondado, raio de ponta ($r\epsilon$) de 0,8 mm e ângulo de ponta (ϵ) de 80° , fabricante Sandvik (figura 4). O respectivo porta-ferramentas tem código ISO DCLNL 2020K12, com ângulo de folga (α) de 6° , ângulo de posição (χ) com 95° , ângulo de saída (γ) de -6° e ângulo de inclinação (λ) com -6° , fabricante Sandvik.

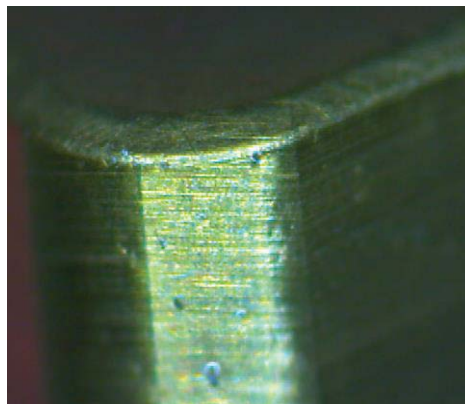


Figura 4 – Ferramenta utilizada nos ensaios, evidenciando o gume chanfrado

Fonte: Autor (2021)

A seguir é apresentado como procedeu-se os ensaios passo a passo.

1) Início dos ensaios: com uma ferramenta que não fez parte dos ensaios, foi realizado um passe no corpo de prova no objetivo de eliminar algumas avarias do mesmo. Com os parâmetros de corte selecionados a ordem dos ensaios foi ditada de acordo com a aleatoriedade gerada pelo *software* Minitab 17, com isso, para cada condição de fluido de corte de acordo com sua forma de aplicação (Jorro ou MQL) e posteriormente o corte a seco. Foi seguido a seguinte ordem de ensaios (Figura 5).

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Vc	f
2	1	1	1	150	0,05
6	2	0	1	125	0,10
4	3	1	1	150	0,15
3	4	1	1	100	0,15
1	5	1	1	100	0,05
5	6	0	1	125	0,10

Figura 5 – Aleatoriedade dos ensaios gerado pelo *software* Minitab
Fonte: Autor (2021)

2) Realização dos ensaios: Os ensaios foram realizados de forma que cada fluido utilizado a jorro (Isento de óleos, semissintético e vegetal) foi aplicado de modo sobre-cabeça onde foi possível inundar totalmente a zona de corte, contendo uma vazão de aproximadamente 5000 ml/h. Para aplicação em MQL (vegetal), foi posicionado o bico pulverizador na interface ferramenta-cavaco (na superfície de saída da ferramenta), garantindo maior penetração na zona de corte, a forma de aplicação foi por nebulização com vazão de aproximadamente 420 ml/h utilizando-se um Nebulizador IV – marca Quimatic Tapmatic. Para cada fluido em relação a seu modo de aplicação e a seco foi feito 6 testes conforme exposto no exemplo ilustrado na Figura 5 acima. Com isso, todas as combinações possíveis de parâmetros foram testadas.

3.5 Obtenção dos resultados

Em relação a coleta dos resultados da força de corte “Fc” se deu por um dinamômetro Kistler modelo 9121 e foi registrado pelo *software* Kistler *Dynoware* interligado a um computador que armazenou a aquisição dos dados em uma taxa de 1000 pontos por segundo (1 kS/s). Em seguida, os dados foram computados e assim gerado os gráficos de resposta para a força principal de corte.

Em relação as medições dos valores de rugosidade “Ra” foram obtidos através da média de três medidas em posições angulares defasadas de 120° em cada superfície torneada com auxílio de um rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-410, com resolução 0,01 µm (*range* 800 µm), 0,001 µm (*range* 80 µm) e 0,0001 µm (*range* 8 µm), com raio de ponta do apalpador de diamante de 5 µm. Os dados obtidos de Ra foram coletados e posteriormente inseridos no *software* estatístico Minitab, a fim de avaliar os melhores resultados a partir dos fluidos e parâmetros utilizados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Medições de força de corte e de rugosidade

Conforme faixa de valores usuais industrialmente de parâmetros para a usinagem do aço AISI 4340 endurecido, foram selecionados valores comumente aplicados conforme diferentes níveis (baixo, médio e alto) para Vc e f, onde após os ensaios foi definido os valores de Fc e Ra, como mostrado na Tabela 5, que apresenta também os resultados das medições de forças e rugosidades.

Condição	Vc (m/min)	f (mm/rot)	ap (mm)	Fc (N)	Ra (µm)
Semissintético (Jorro)	150	0,05	0,5	452,3	0,235
	125	0,1	0,5	729,4	0,200
	150	0,15	0,5	877,1	0,941
	100	0,15	0,5	907,3	1,288
	100	0,05	0,5	461,4	0,155
	125	0,1	0,5	706,5	0,269
Condição	Vc (m/min)	f (mm/rot)	ap (mm)	Fc (N)	Ra (µm)
Vegetal (Jorro)	150	0,05	0,5	430,5	0,228
	125	0,1	0,5	700,1	0,761
	150	0,15	0,5	875,2	1,445
	100	0,15	0,5	904,1	1,483
	100	0,05	0,5	461,3	0,177
	125	0,1	0,5	733,3	0,489
Condição	Vc (m/min)	f (mm/rot)	ap (mm)	Fc (N)	Ra (µm)
Vegetal (MQL)	150	0,05	0,5	429,7	0,284
	125	0,1	0,5	706,7	0,685
	150	0,15	0,5	865,1	1,377
	100	0,15	0,5	903	1,461
	100	0,05	0,5	461,1	0,225
	125	0,1	0,5	709,3	0,757
Condição	Vc (m/min)	f (mm/rot)	ap (mm)	Fc (N)	Ra (µm)
Isento de Óleos (Jorro)	150	0,05	0,5	424	0,204
	125	0,1	0,5	682,5	0,296
	150	0,15	0,5	848,5	0,311
	100	0,15	0,5	893,6	0,328
	100	0,05	0,5	451,7	0,168
	125	0,1	0,5	747,3	0,275
Condição	Vc (m/min)	f (mm/rot)	ap (mm)	Fc (N)	Ra (µm)
Corte a Seco	150	0,05	0,5	442,2	0,192
	125	0,1	0,5	734,8	0,658
	150	0,15	0,5	853,6	1,201
	100	0,15	0,5	890,3	1,255
	100	0,05	0,5	480,7	0,151
	125	0,1	0,5	727	0,434

Tabela 5 – Resultados Ra e Fc

Fonte: Autor (2021)

Na tabela 5 a coluna representada por “Fc” está contabilizada a média da força principal de corte obtida durante os ensaios, o mesmo para a coluna “Ra” onde contabiliza os valores médios de três medidas para o parâmetro de rugosidade Ra.

Para todas as combinações de parâmetros e condições de usinagem diferentes, foram realizados um total de 30 ensaios.

4.2 Resultados de Rugosidade Ra

4.2.1 Efeitos das Condições de Usinagem sobre a Rugosidade

O gráfico de efeitos (Figura 6) apresenta uma análise correlacionando os parâmetros de usinagem (f e V_c) juntamente com as respectivas condições de corte. A relação é feita com base na resposta sendo o resultado médio de R_a de todas as combinações do experimento para determinada condição de fluido, Corte a seco, f e V_c .

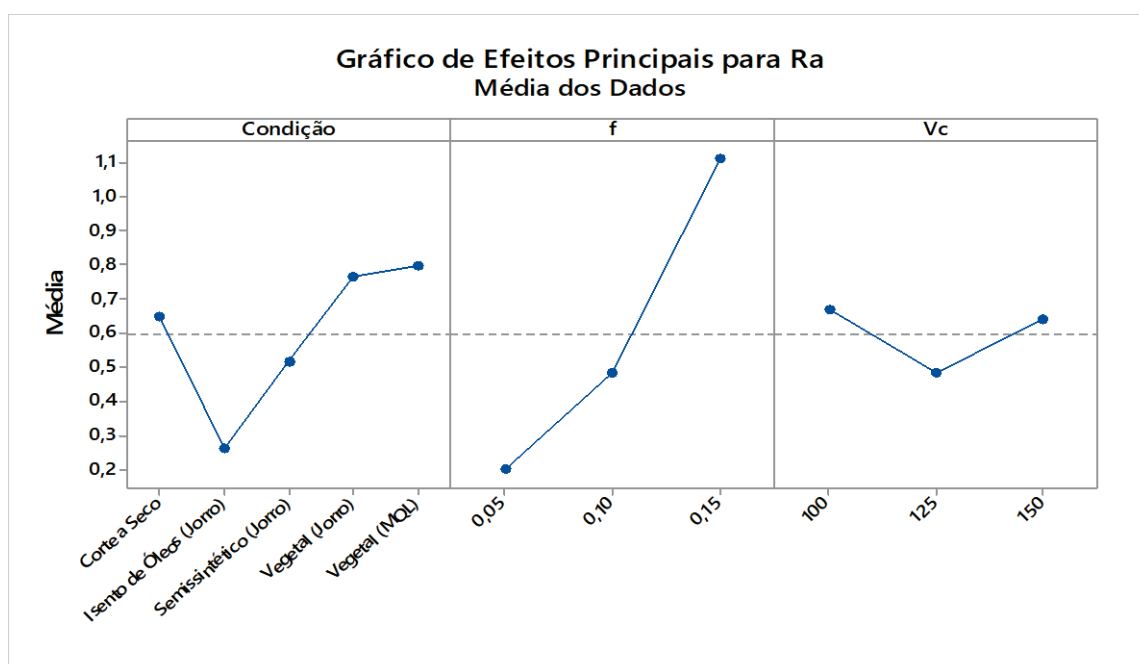


Figura 6 – Gráfico de efeitos para R_a

Fonte: Autor (2021)

Conforme figura 6, é possível perceber que o fluido de corte isento de óleos aplicado a jorro, se destacou positivamente por contribuir com uma baixa rugosidade no total de todos os ensaios, seguido pelo fluido semissintético, já o fluido vegetal, não teve uma contribuição geral benéfica para fins de acabamento superficial. A explicação que pode ser dada para esse comportamento, é que o fluido isento de óleos apresenta maior viscosidade dos que os demais conforme podem ser vistos na Tabela 4 (seção 3.2), portanto, ocasionando em uma leve diminuição de atrito entre peça-ferramenta e contribuindo para um melhor acabamento, predominando o efeito de lubrificação.

Em relação aos parâmetros de usinagem analisados (V_c e f), é possível constatar que o avanço é o principal influente o mesmo é afirmado em um estudo realizado por (Davin e Figueira, 2007). Quando trabalhamos com controle de rugosidade, com isso, tem-se que quando o avanço aumenta, o acabamento superficial sofre uma queda acentuada, em outras palavras, a rugosidade R_a aumenta. Já a V_c não é considerada um parâmetro influente, devido a sua alteração não impactar de forma contundente os resultados de R_a .

4.2.2 Influências da velocidade de corte e do avanço sobre a rugosidade

Os gráficos de superfície de R_a (Figura 7) foram plotados a fim de poder visualizar o comportamento de cada condição de fluido de corte em particular. Portanto foi correlacionado a rugosidade R_a , com os respectivos parâmetros de usinagem.

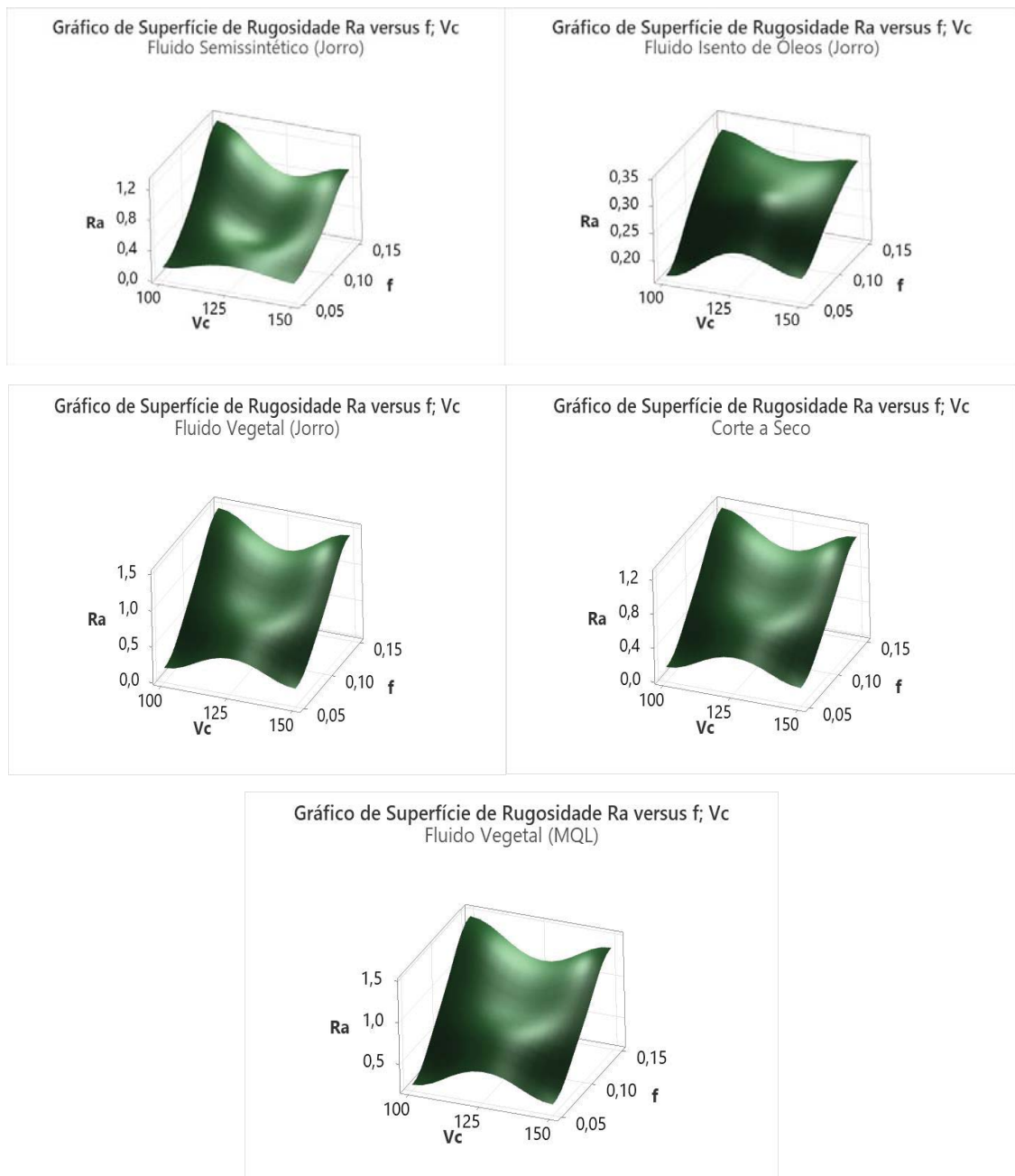


Figura 7 – Comportamento Ra em relação à Vc e f para diferentes fluidos e a seco

Fonte: Autor (2021)

Fazendo um apanhado geral para todas as situações, devido as mesmas se mostrarem muito semelhantes, pode-se confirmar o comportamento do avanço conforme foi apresentado no gráfico de efeitos, agora sendo analisado as situações em cada caso particular, onde o próprio se mostra influente em todas as situações na alteração de Ra, sendo maléfico para o processo quando seu valor é crescente.

Isso pode ser explicado em decorrência de que maiores valores de avanços tendem a ocasionar em maiores vibrações na peça, ocorrendo assim uma perda de acabamento superficial devido a essas vibrações (Ferraresi, 1977). Pode ser correlacionado também com a questão de que quanto maior for o avanço, acaba ocasionando em maiores riscos no sentido longitudinal da peça, que são os sulcos formados ao longo do percurso de corte na superfície cilíndrica da peça piorando o acabamento final (MACHADO et al., 2011).

Já a Vc se mostra com pouca influência na alteração da rugosidade (Das et al., 2018). Isso é caracterizado pois a mesma não apresenta relação geométrica com a morfologia da superfície

gerada, apenas que há uma tendência de redução da rugosidade com o aumento da V_c em função da dinâmica do corte e a da redução do coeficiente de atrito na formação do cavaco.

Kumar, Singh e Kalsi (2017) também obtiveram a mesma conclusão em seu estudo comparativo entre fluidos e modo de aplicação (MQL, Jorro e Corte seco) na usinagem do aço AISI 4340. Definindo o avanço como principal influente e enfatizando a insignificância da velocidade de corte em relação a R_a .

4.2.3 Análise do efeito do avanço em relação a cada condição de corte

Conforme já apurado, o avanço é o principal causador de alteração de acabamento superficial, com isso, foi analisado todas as condições de fluidos e corte e a seco em diferentes avanços, sendo possível identificar o quanto cada fluido contribuiu para uma melhora ou piora da rugosidade. Esta relação é diferentemente interpretada a do gráfico de efeitos mencionado na seção 4.2.1, onde era exposto somente uma média geral dos ensaios, não sendo possível identificar em particular e definir o real comportamento de cada situação; portanto, com auxílio da Figura 8 é possível definir a significância que cada fluido apresenta dentro do parâmetro mais favorável de usinagem, que seria o de menor avanço.

Os demais gráficos para as condições onde $f=0,10$ mm/rot e $f=0,15$ mm/rot estão exibidos no apêndice A, devido aos mesmos não contribuírem de forma positiva para uma melhora do acabamento superficial; todavia os mesmos são ilustrados a fim de serem apresentados de forma que pode-se visualizar as devidas conclusões de desempenho dos mesmos.

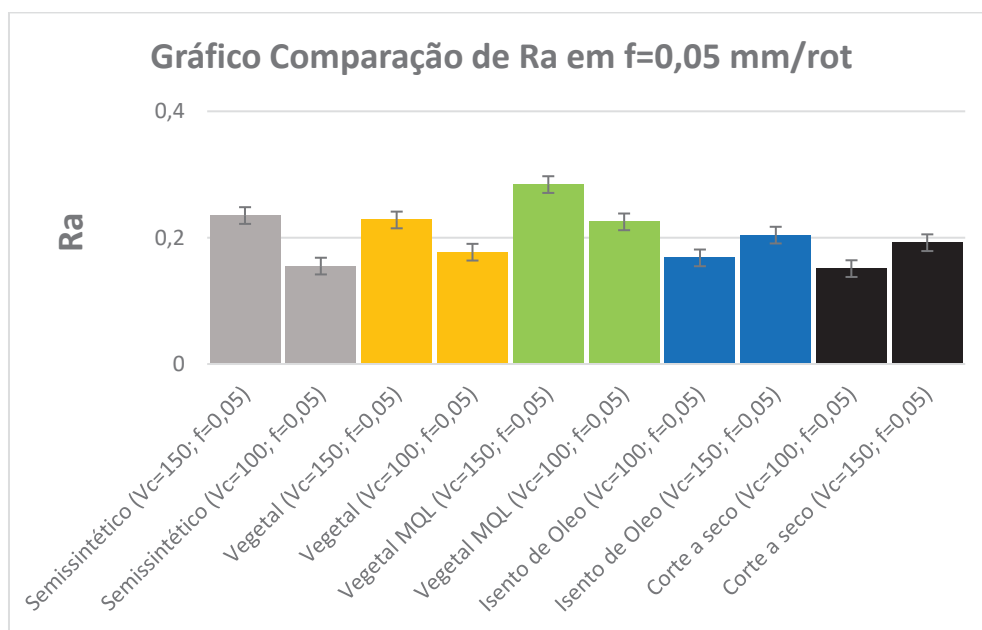


Figura 8 – Comparação da rugosidade R_a em $f=0,05$ mm/rot

Fonte: Autor (2021)

Na Figura 8, onde $f=0,05$ mm/rot, é possível identificar em particular o comportamento de cada fluido respectivamente relacionado com as velocidades de 100 e 150 m/min. Contudo, associado à sua melhor condição de corte, a rugosidade R_a se mostrou independente da utilização de fluido de corte, isso é possível ser notado identificando o comportamento das barras da figura 8, onde não se tem uma melhora contundente quando é aplicado fluido de corte, seja a jorro ou em MQL, o mesmo resultado foi obtido por estudos feitos por dois autores (Soares, 2016; Carvalho, 2012). Com isso, é possível definir que o corte a seco pode ser a melhor opção para a usinagem do aço AISI 4340 endurecido, levando em conta que a utilização de fluidos além de gerar gastos e manutenções acarreta em nenhum benefício para R_a .

Essa insignificância dos fluidos de corte para essa usinagem pode ser explicada e associada em função da microgeometria da ferramenta utilizada para estes ensaios, devido a mesma ter interferência direta neste aspecto, que tem gume chanfrado e com isso o material em deformação e em cisalhamento é comprimido contra a peça, com isso, impedindo de que o fluido penetre de forma eficiente na zona de corte e afetando diretamente a função de lubrificação. Outro fator que pode ser levado em conta, mas não comprovado fisicamente por estas análises, é a questão do poder refrigerante dos fluidos utilizados, onde os mesmos podem influenciar negativamente nesta usinagem, devido ao calor gerado na zona de corte ser benéfico para o cisalhamento, facilitando o corte, com isso a utilização de fluido pode prejudicar esse cisalhamento tornando a usinagem “mais difícil” (SANTOS; SALES, 2007).

4.3 Resultados da Força principal de corte (F_c)

4.3.1 Efeitos das Condições de Usinagem sobre a Força Principal de Corte

Na Figura 9 é apresentada a influência dos efeitos principais dos parâmetros de usinagem (f e V_c), juntamente com as condições de aplicação de fluidos, tendo como resposta a média geral de todos os ensaios para F_c .

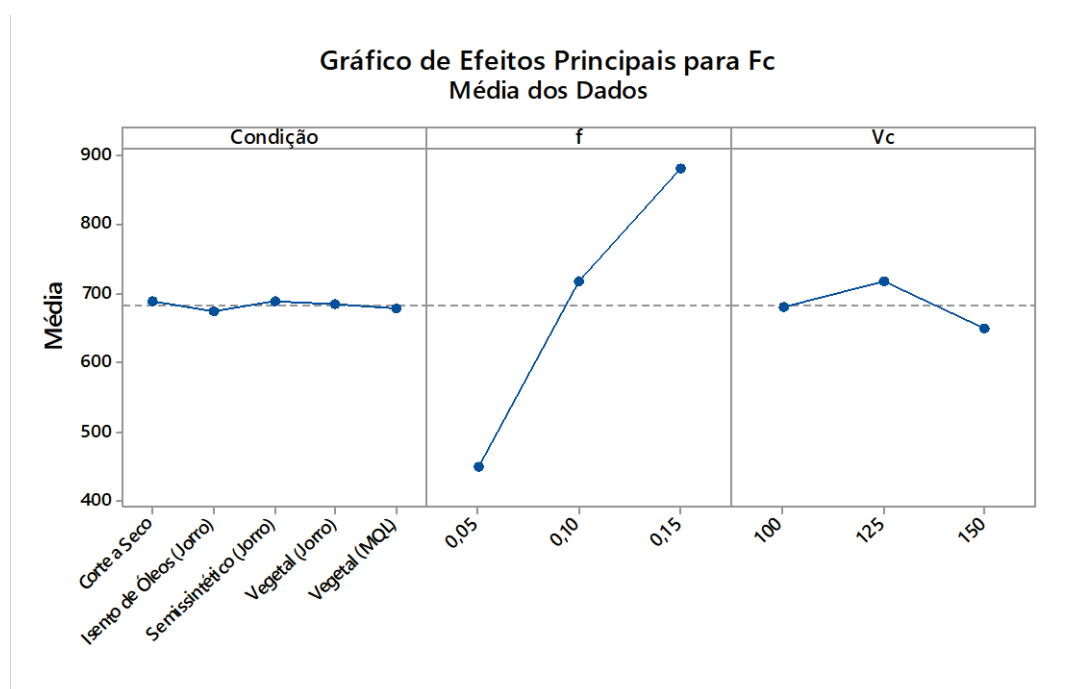


Figura 9 – Gráfico de efeitos para F_c

Fonte: Autor (2021)

Conforme apresentado na Figura 9 é possível identificar que todos os fluidos independentemente da forma de aplicação e juntamente com o corte a seco, não apresentam variações nas forças de usinagem de forma geral (média de todos ensaios) o mesmo resultado foi obtido por (SOARES, 2016).

Já em relação aos parâmetros de corte, conforme o avanço aumenta seu valor, a força F_c também aumenta. Para a V_c , a variação é considerada desprezível, contendo uma alteração mínima e nada significativa na alteração da força.

4.3.2 Influências da velocidade de corte e do avanço sobre a força de corte

Para cada condição de aplicação de fluido de corte, foi plotado um gráfico de superfície para uma melhor análise particular do comportamento dos parâmetros de corte. Os mesmos podem ser vistos na Figura 10.

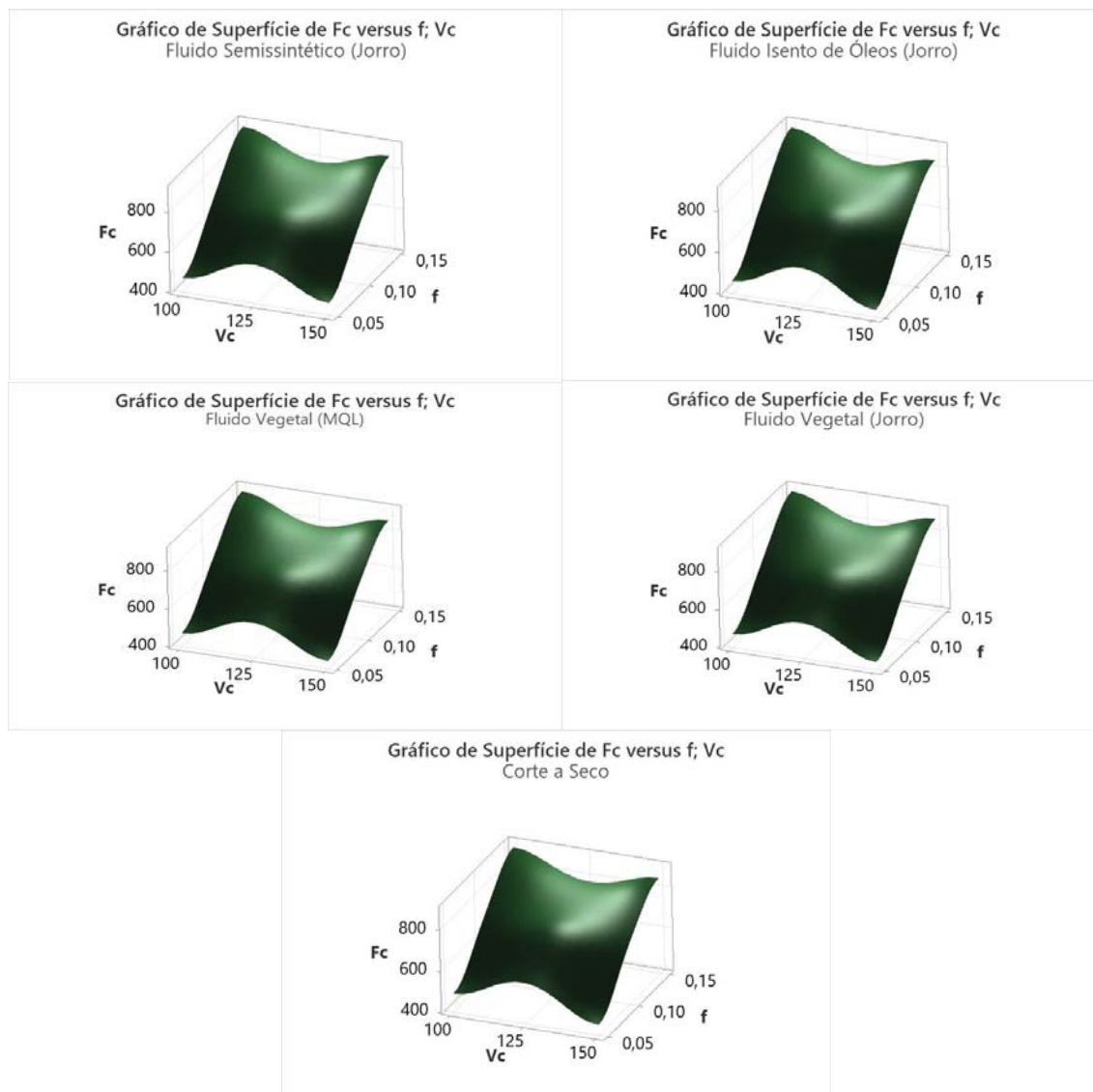


Figura 10 – Comportamento de Fc em relação aos parâmetros de corte para diferentes fluidos e a seco

Fonte: Autor (2021)

Conforme apresentado no gráfico de efeitos, o avanço se destaca como principal parâmetro influente em relação a Fc e essa conclusão pode ser confirmada de acordo com os gráficos acima para cada condição de corte, sendo com a utilização de fluidos ou a seco, definindo valores mais altos de avanço como causador do aumento de Fc, o mesmo também pode ser observado na análise feita por (Suresh et al., 2012). Já em relação a velocidade não ocorre efeito significativo, uma vez que na faixa de velocidades usadas nos ensaios, o efeito de Vc sobre a Fc é insignificante, tendo apenas um leve decréscimo quando o aumento de Vc acarreta em maior geração de calor reduzindo as tensões de deformação e cisalhante na formação do cavaco.

O comportamento crescente das forças a medida que f aumenta é justificado devido a decorrência de que o avanço em 0,15mm/rot e 0,10mm/rot abrangem maiores seções de corte

(área) e, por aumentar a área de corte, acaba dificultando o cisalhamento do material e tendendo a imprimir maior força para realizar a usinagem.

4.3.3 Análise de correlação entre Força e Rugosidade

Para apresentar a influência das forças diretamente ligada a rugosidade, foi elaborado os gráficos de superfície para cada condição de corte imprimida, sendo apresentado na Figura 11 o comportamento particular de cada situação.

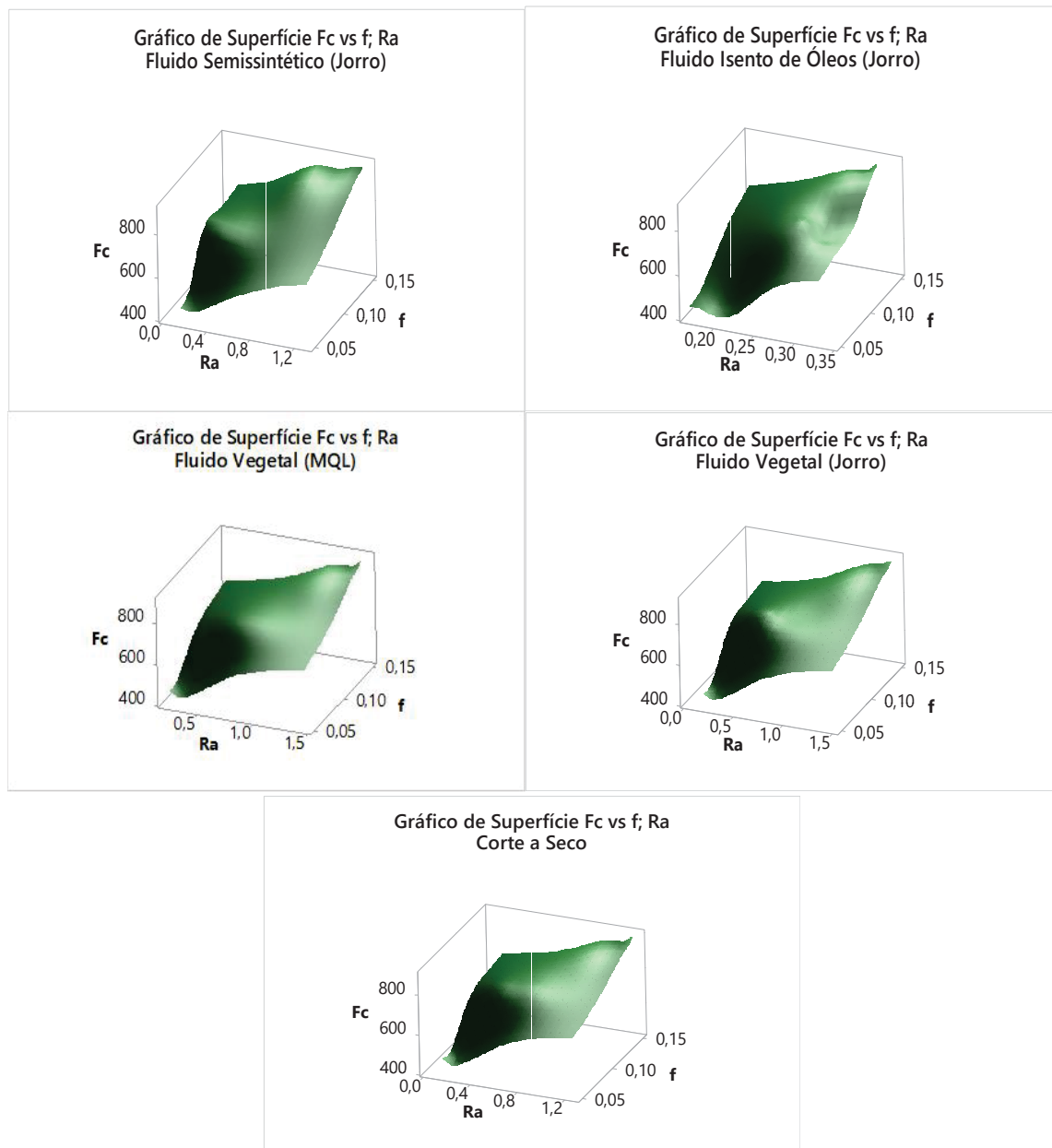


Figura 11 – Análise de Ra e f sobre Fc para diferentes fluidos e a seco

Fonte: Autor (2021)

Desta forma, nota-se a crescente e proporcional alteração da rugosidade quando as forças se elevam, portanto, é de extrema importância o controle dos parâmetros de corte quando a principal finalidade é trabalhar com bons acabamentos superficiais. Com isso, a melhor maneira de executar essa usinagem com maior otimização, é controlando os parâmetros de usinagem de forma correta, em especial, o avanço (SOUZA, 2011).

4.4 Comparação da utilização do fluido Vegetal a Jorro x MQL

4.4.1 Efeitos do modo de aplicação e avanço

É apresentado na Figura 12 a diferença no modo de aplicação dos fluidos, quanto utiliza-se baixa vazão (MQL), comparado com alta vazão (Jorro) e também a influência do avanço em relação a Ra nestes modos de aplicação.

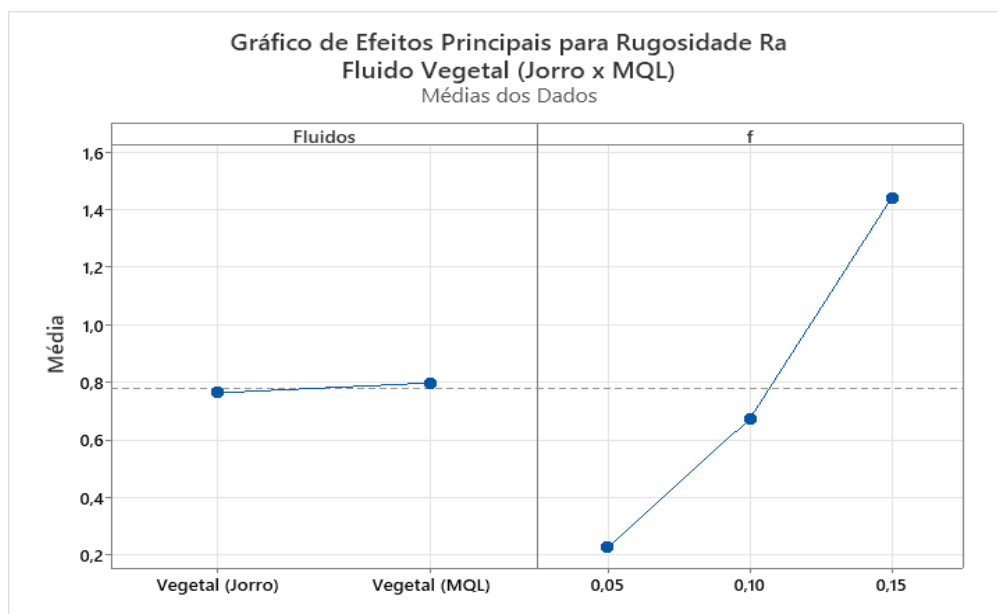


Figura 12 – Efeito aplicação Jorro x MQL

Fonte: Autor (2021)

Como já pontuado anteriormente e devidamente justificado para as considerações feitas nas seções acima, o avanço é também considerado influente neste caso comparativo.

Em relação aos fluidos pode-se notar que a alteração no modo de aplicação é completamente desprezível para esse caso em questão, não havendo alteração positiva quando utiliza-se maiores vazões de fluido. O mesmo resultado obtido nessa comparação, pode ser correlacionado ao estudo mencionado nos resultados acima para as outras condições de corte, apresentando por (Soares, 2016). As demais ponderações são feitas abaixo com a análise particular de cada situação.

4.4.2 Análise da comparação MQL x Jorro

Conforme a Figura 13, pode ser visto as duas comparações no modo de aplicação dos fluidos, onde correlacionado diretamente com Ra e com os parâmetros utilizados nos determinados casos.

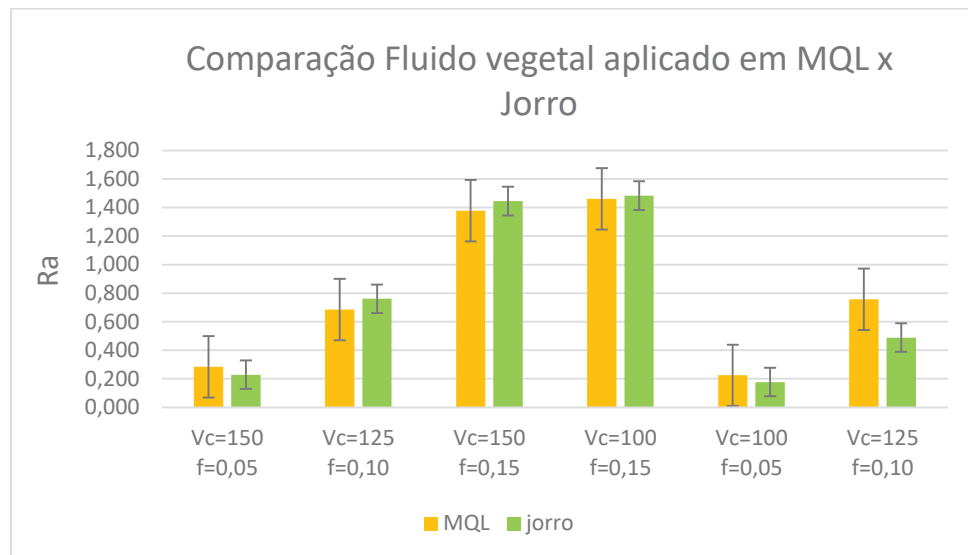


Figura 13 – Fluido Vegetal aplicado a Jorro x MQL
 Fonte: Autor (2021)

A utilização de fluidos de corte sustentáveis em menor escala é um fator importante que gera corte de gastos com o uso de fluidos e a preservação do meio ambiente e da saúde do operador (GAJRANI e SANKAR, 2017).

A análise em questão correlaciona a aplicação de óleo vegetal utilizando a técnica de aplicação a jorro de alta vazão (5000 ml/h), em relação a baixa vazão de fluido MQL (420 ml/h). Contudo, foi possível verificar que tanto a aplicação a jorro, quanto em MQL não houve variação significativa no quesito rugosidade quando utilizado baixo avanço, independentemente da velocidade de corte, os valores obtidos são muito próximos em ambas situações, com isso, a utilização em excesso de óleo vegetal na condição de (Vc=150 m/min; f=0,05 mm/rot e Vc=100 m/min; f=0,05 mm/rot), não altera a rugosidade significativamente a fim de configurar um ou outro método como mais produtivo na usinagem do aço endurecido AISI 4340.

O mesmo resultado pode ser explicado de acordo com a insignificância de lubrificação na usinagem desse material, sendo justificado pelo baixo índice de penetração dos fluidos na zona de corte devido ao cavaco ser comprimido diretamente contra a peça em função do tipo de ferramenta utilizada nos ensaios, mesma justificativa dada na seção 4.2.3 onde a falta de lubrificação ocorreu, sendo assim, ocasionando na dificuldade de o fluido formar a película de óleo entre peça-ferramenta. Portanto os dois métodos apresentam resultados semelhantes, sendo considerado os melhores em baixo avanço (f=0,05 mm/rot), onde apresentam os valores mais eficientes de rugosidade.

5 CONCLUSÕES

- Em relação a Rugosidade Ra a respeito da utilização dos fluidos de corte, foi possível observar que o desempenho final de todos fluidos aplicados a jorro e também a aplicação em MQL do fluido vegetal se sobressaíram com comportamento semelhante ou até mesmo inferior a usinagem a seco, portanto, devido a gastos e manutenções quando utiliza-se fluidos de corte, a melhor opção para usinagem do aço 4340 endurecido e com ferramenta de cerâmica tipo “S” se torna mais ideal a condição a seco. Já a respeito dos parâmetros de corte, o avanço mais baixo testado (f=0,05 mm/rot) se mostrou mais eficiente pois foi o que menos acarretou em variações extremas de Ra, contribuindo para uma melhora superficial, já a velocidade de corte, a mesma

não apresentou grande influência significativa, portanto não foi possível definir uma melhor faixa de valor correlacionando a mesma com Ra.

- Para a força principal de corte F_c , a aplicação de fluidos de corte independentemente do modo de aplicação não apresentou melhoras na sua minimização, com isso, não auxiliando na minimização de possíveis vibrações. Contudo, quanto aos parâmetros de corte, o avanço foi o mais influente, tendo seu aumento diretamente ligado a elevação da força F_c pelo aumento da seção de corte e influenciando em grande escala o acabamento superficial.
- A respeito da comparação do fluido vegetal aplicado em MQL x Jorro, conclui-se que o modo de aplicação para o fluido vegetal tanto em baixa quanto em alta vazão apresentou diferença desprezível, evidenciando comportamentos semelhantes em relação a rugosidade, sendo esse comportamento explicado devido à dificuldade de o fluido penetrar na zona de corte de forma eficiente.
- O fato de não haver diferenças significativas nos tipos e modos de aplicação dos fluidos experimentados, e considerando questões ambientais e econômicas, o uso de MQL e a seco mostram ser vantajosos quando se usa ferramenta de cerâmica no torneamento de acabamento do aço AISI 4340 endurecido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A MAHADI, M *et al.* Vegetable Oil-Based Lubrication in Machining: issues and challenges. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S.L.], v. 530, p. 012003, 15 jul. 2019.

ALVES, Salete Martins; OLIVEIRA, João Fernando Gomes de. Adequação ambiental dos processos usinagem utilizando Produção mais limpa como estratégia de gestão ambiental. **Production**, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 129-138, abr. 2007.

ANAND, Abhishek; BEHERA, Ajay Kumar; DAS, Sudhansu Ranjan. An overview on economic machining of hardened steels by hard turning and its process variables. **Manufacturing Review**, [S.L.], v. 6, p. 1-9, 2019.

ASLAN, Ersan; CAMUSCU, Necip; BIRGÖREN, Burak. Design optimization of cutting parameters when turning hardened AISI 4140 steel (63 HRC) with Al₂O₃+TiCN mixed ceramic tool. **Materials & Design**, [S.L.], v. 28, n. 5, p. 1618-1622, jan. 2007.

AZOMATERIALS. **AISI 4340 Alloy Steel (UNS G43400)**. 2012. Disponível em: < <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6772> >. Acesso em: 11 abr. 2021.

BAG, Rabinarayan *et al.* A Perspective Review on Surface Integrity and Its Machining Behavior of AISI 4340 Hardened Alloy Steel. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 18, p. 3532-3538, 2019.

BORBA, Vinícius Rodrigues. **ANÁLISE DA FORÇA DE USINAGEM E DA RUGOSIDADE NO TORNEAMENTO DE AÇOS ENDURECIDOS COM FERRAMENTAS DE PCBN E DE METAL-DURO**. 2016. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

BOSWELL, B. *et al.* A review identifying the effectiveness of minimum quantity lubrication (MQL) during conventional machining. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 92, n. 1-4, p. 321-340, 23 fev. 2017.

BOUBEKRI, Nourredine; SHAIKH, Vasim. Machining Using Minimum Quantity Lubrication: A Technology for Sustainability. **International Journal Of Applied Science And Technology**. USA, p. 111-115. jan. 2012.

CARVALHO, Edwilson Firmino de. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO FLUIDO DE CORTE NO TORNEAMENTO CONVENCIONAL DO AÇO ABNT 4340**. 2012. 46 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Mecânica, Centro Universitario Sul de Minas, Virgínia, 2012.

CHETAN; GHOSH, Sudarsan; RAO, P. Venkateswara. Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 100, p. 17-34, ago. 2015.

CORDEIRO, Yasmim Monteiro *et al.* Aspectos Técnicos e Ambientais dos Óleos Lubrificantes Minerais versus Vegetais em Aplicações de Metal Working com Ênfase em Usinagem. **Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana**, Rio de Janeiro, n. 11, p. 20-39, 2020.

DAS, Rabin Kumar *et al.* Comparative machining performance of hardened AISI 4340 Steel under dry and minimum quantity lubrication environments. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 5, n. 11, p. 24898-24906, 2018.

DAVIM, J. Paulo; FIGUEIRA, Luís. Machinability evaluation in hard turning of cold work tool steel (D2) with ceramic tools using statistical techniques. **Materials & Design**, [S.L.], v. 28, n. 4, p. 1186-1191, jan. 2007.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: MM Editora Ltda, 2014. 242 p.

ELEWAB, I. *et al.* Comparative Study on the Effect of Vegetable Based Cutting Fluid and Mineral Oil on Cutting Forces and Surface Roughness during Turning Operation. (Dept. M (Production). **Bulletin Of The Faculty Of Engineering, Mansoura University**, [S.L.], v. 40, n. 4, p. 121-131, 12 jul. 2020.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. [S. l.]: Edgard Blucher Ltda, 1977. 751 p.

GAJRANI, Kishor Kumar; SANKAR, M. Ravi. Past and Current Status of Eco-Friendly Vegetable Oil Based Metal Cutting Fluids. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 4, n. 2, p. 3786-3795, 2017.

GUNJAL, Shrikant U.; PATIL, Nilesh G.. Experimental Investigations into Turning of Hardened AISI 4340 Steel using Vegetable based Cutting Fluids under Minimum Quantity Lubrication. **Procedia Manufacturing**, [S.L.], v. 20, p. 18-23, 2018.

KHAN, M. M. A.; DHAR, N. R.. Performance evaluation of minimum quantity lubrication by vegetable oil in terms of cutting force, cutting zone temperature, tool wear, job dimension and surface finish in turning AISI-1060 steel. **Journal Of Zhejiang University-Science A**, [S.L.], v. 7, n. 11, p. 1790-1799, nov. 2006.

KOPAC, J; BAHOR, M. Interaction of the technological history of a workpiece material and the machining parameters on the desired quality of the surface roughness of a product. **Journal Of Materials Processing Technology**, [S.L.], v. 92-93, p. 381-387, ago. 1999.

KUMAR, Sanjeev; SINGH, Dilbag; KALSI, Nirmal S.. Analysis of Surface Roughness during Machining of Hardened AISI 4340 Steel using Minimum Quantity lubrication. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 4, n. 2, p. 3627-3635, 2017.

LAWAL, Sunday Albert; CHOUDHURY, Imtiaz Ahmed; NUKMAN, Yusoff. A critical assessment of lubrication techniques in machining processes: a case for minimum quantity lubrication using vegetable oil-based lubricant. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 41, p. 210-221, fev. 2013.

LIMA, Francisco; CORRÊA, Maurício. Usinagem de materiais endurecidos. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 23, n. 1, p. 38-44, dez. 2002.

MACHADO, A. R. *et al.* **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

MACHADO, Álisson Rocha *et al.* **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2015. 407 p.

MACHADO, Álisson Rocha *et al.* **Teoria da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2009. 371 p.

MATSUMOTO, Hidekasu. **Uma Contribuição ao Estudo do Processo de Torneamento de Aços Endurecidos**. 1998. 148 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

METALS, Ggd. **Aço Construção Mecânica**: SAE 4340. 2020. Disponível em: < <https://www.ggdmets.com.br/produto/SAE-4340/> >. Acesso em: 11 abr. 2021.

MONTGOMERY, Douglas C.. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 7. ed.: Ltc, 2018. 528 p.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C.. **Estatística Aplicada e Probabilidade: para engenheiros**. 4. ed.: Ltc, 2009. 514 p.

PAL, Awadhesh; CHOUDHURY, S.K.; CHINCHANIKAR, Satish. Machinability Assessment through Experimental Investigation during Hard and Soft Turning of Hardened Steel. **Procedia Materials Science**, [S.L.], v. 6, p. 80-91, 2014.

PAUL, P. Sam; VARADARAJAN, A.s.; GNANADURAI, R. Robinson. Study on the influence of fluid application parameters on tool vibration and cutting performance during turning of hardened steel. **Engineering Science And Technology, An International Journal**, [S.L.], v. 19, n. 1, p. 241-253, mar. 2016.

SALES, Wisley Falco; DINIZ, Anselmo Eduardo; MACHADO, Álisson Rocha. Application of cutting fluids in machining processes. **Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences**, [S.L.], v. 23, n. 2, p. 227-240, 2001.

SANTOS, Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Artliber, 2007.

SERRAMETAL, Editora. **Aço: Influência da Liga do Material e suas Aplicações**. 2020. Disponível em: < <https://serrametal.com.br/aco-influencia-da-liga-do-material-e-suas-aplicacoes/> >. Acesso em: 11 abr. 2021.

SOARES, Christianne Lacerda. **INFLUÊNCIA DO MODO DE APLICAÇÃO DO FLUIDO DE CORTE SOBRE A USINABILIDADE DO AÇO ABNT 4340 NO TORNEAMENTO**. 2016. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

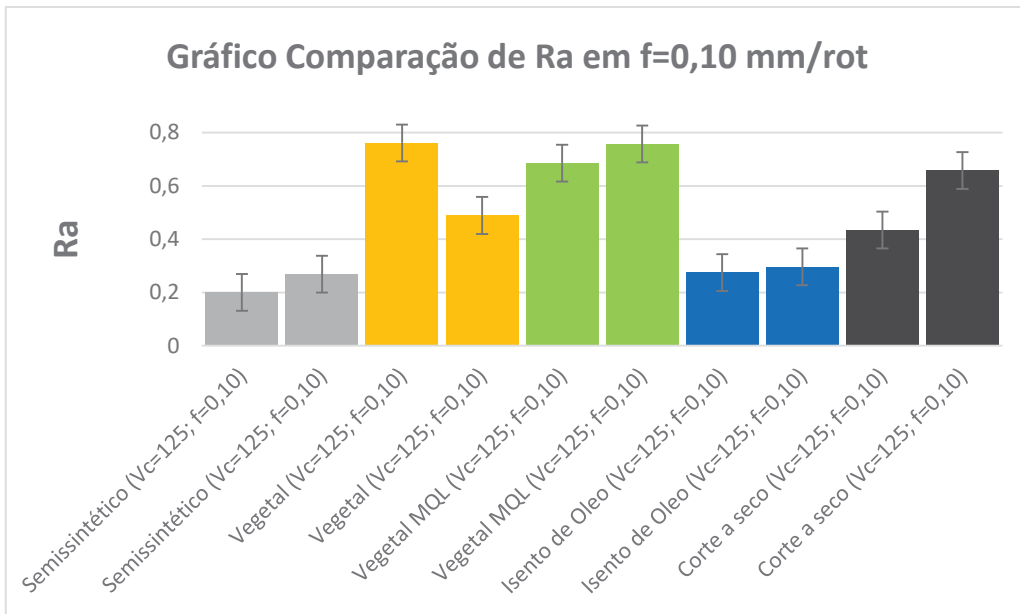
SOUZA, A. J. D. Processos de Fabricação por Usinagem – Parte1. (Apostila) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Escola de Engenharia – Departamento de Engenharia Mecânica. Porto Alegre, p. 89. 2011.

SURESH, R. *et al.* Machinability investigations on hardened AISI 4340 steel using coated carbide insert. **International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials**, [S.L.], v. 33, p. 75-86, jul. 2012.

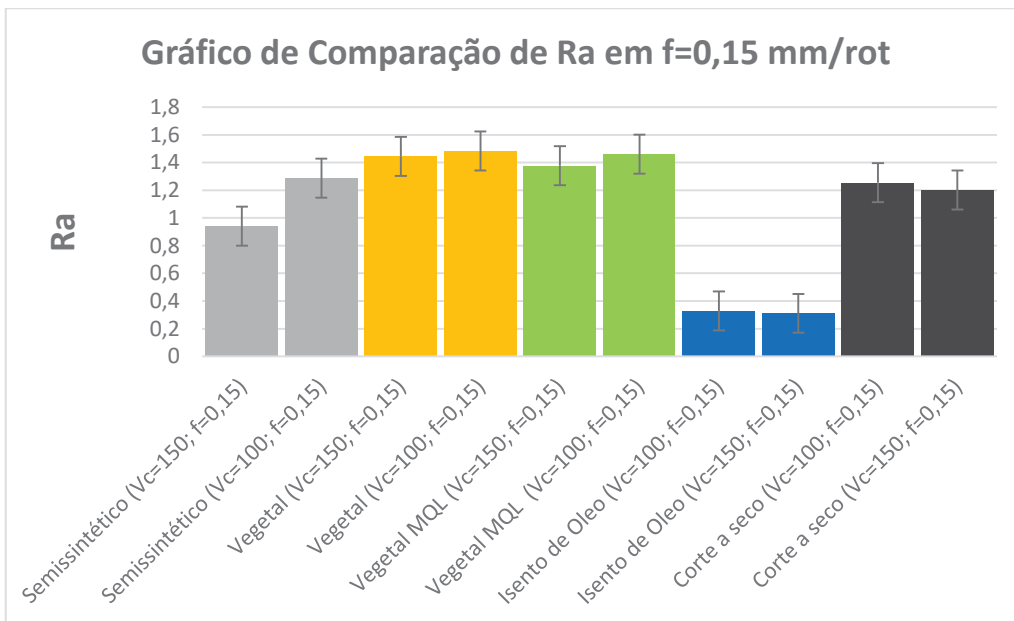
TAZEHKANDI, Ahmadreza Hosseini; SHABGARD, Mohammadreza; PILEHVARIAN, Farid. On the feasibility of a reduction in cutting fluid consumption via spray of biodegradable vegetable

oil with compressed air in machining Inconel 706. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 104, p. 422-435, out. 2015.

APÊNDICE A – Comparação da rugosidade Ra para $f=0,010$ mm/rot e $f=0,015$ mm/rot



Fonte: Autor (2021)



Fonte: Autor (2021)