

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E MECÂNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Beatriz Lodron Gonzaga**

**Proposta de Estudo da Influência da Utilização de Grafeno Adicionado ao  
Fluido de Corte no Processo de Usinagem**

Juiz de Fora

2020

Beatriz Lodron Gonzaga

**Proposta de Estudo da Influência da Utilização de Grafeno Adicionado ao  
Fluido de Corte no Processo de Usinagem**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Renato Pagotto

Juiz de Fora

2020

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Lodron Gonzaga, Beatriz.

Proposta de Estudo da Influência da Utilização de Grafeno Adicionado ao Fluido de Corte no Processo de Usinagem / Beatriz Lodron Gonzaga. -- 2020.

40 p.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Renato Pagotto  
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2020.

1. Grafeno. 2. Fluido de corte. 3. Processos de Usinagem. 4. Rugosidade. I. Renato Pagotto, Prof. Dr. Carlos , orient. II. Título.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais e familiares pelo amor, incentivo e apoio incondicional desde o início da minha trajetória. Agradeço à minha mãe Tânia, heroína que me deu suporte nas horas difíceis, de desânimo e cansaço. Ao meu pai Ricardo, que apesar de todas as dificuldades, me fortaleceu e me deu garra para vencer todos os obstáculos. Agradeço ao meu irmão Gustavo, pela ajuda desde o início da minha vida longe dos pais e à minha irmã Cecília, que mesmo não estando presente diariamente em grande parte de sua infância, nunca se esqueceu de mim.

Obrigada meus amigos e familiares, que nos momentos de minha ausência dedicados ao estudo e vida atlética, sempre fizeram entender que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente. Meus agradecimentos aos meus grandes amigos Géssyca e Gabriel, companheiros para toda vida.

Agradeço ao professor Carlos Renato Pagotto, pela orientação, apoio, confiança e dedicação à elaboração deste trabalho e a todos os professores por me proporcionarem o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de minha formação profissional.

Por fim, à Universidade Federal de Juiz de Fora, seu corpo docente, direção e administração, pela oportunidade de poder cursar um ensino superior de qualidade e respeito.

"Nunca desista de seus sonhos". (Augusto Cury)

## RESUMO

Processos de usinagem estão presentes em indústrias de todos os segmentos, principalmente o de metal mecânica, sendo aplicados para dar forma e/ou acabamento a uma peça. Tais processos geram uma grande quantidade de calor que provoca resultados indesejáveis e elevação do custo de produção do produto final. Para reduzir ou dissipar o calor gerado utiliza-se os fluidos de corte. Nas últimas décadas, tem se observado um grande interesse no desenvolvimento de materiais nanoestruturados baseados em carbono, tais como os fulerenos, os nanotubos de carbono, e mais recentemente, o grafeno, sendo este considerado um excelente lubrificante sólido. Dessa forma, a adição de grafeno ao fluido de corte foi considerado como uma variável a ser investigada no processo de usinagem convencional utilizando o torno CNC (Computer Numeric Control), afim de obter resultados significativos em relação ao parâmetro de rugosidade da peça.

Palavras-chave: Grafeno. Fluido de Corte. Usinagem. Rugosidade.

## ABSTRACT

Machining processes are present in industries of all segments, mainly the mechanical metal, being applied to shape and/or finish a part. Such processes generate a large amount of heat that causes undesirable results and increases the production cost of the final product. Cutting fluids are used to reduce or dissipate the heat generated.

In the last decades, there has been a great interest in the development of carbon-based nanostructured materials, such as fullerenes, carbon nanotubes, and more recently, graphene, which is considered an excellent solid lubricant. Thus, the addition of graphene to the cutting fluid was considered a variable to be investigated in the conventional machining process using the CNC lathe, in order to obtain significant results in relation to the part roughness parameter.

Key-words: Graphene. Cutting Fluid. Machining. Roughness.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Processos Tradicionais de Usinagem . . . . .	15
Figura 2 – Integridade Superficial . . . . .	16
Figura 3 – Rugosidade média . . . . .	18
Figura 4 – Rugosidade máxima . . . . .	18
Figura 5 – Rugosidade total . . . . .	19
Figura 6 – Tipos, composição e propriedades dos fluidos de corte . . . . .	23
Figura 7 – Alotropia do Carbono . . . . .	26
Figura 8 – Imagens de MEV, ensaios com penetração de trabalho de 10 $\mu\text{m}$ , 2 passos, utilizando . . . . .	28
Figura 9 – Imagens de MEV, ensaios com penetração de trabalho de 10 $\mu\text{m}$ , 3 passos, utilizando . . . . .	28
Figura 10 – Resultados para diferentes materiais e concentrações de nanopartículas dispersas no fluido de corte, relacionado-os com: . . . . .	29
Figura 11 – Redução percentual do atrito em aplicação automotiva do uso de multi- camadas de grafeno adicionado em função da concentração e tipo de aditivo . . . . .	30
Figura 12 – TRMs do processo de EDM com e sem adição de grafeno ao fluido dielétrico. . . . .	30
Figura 13 – RDs do processo de EDM com e sem adição de grafeno ao fluido dielétrico.	31
Figura 14 – Rugosidade das peças usinadas com e sem adição de grafeno ao fluido dielétrico . . . . .	31
Figura 15 – Rugosidade Rz das peças usinadas com e sem adição de grafeno ao fluido dielétrico. . . . .	32
Figura 16 – Resultados de medição de temperatura na usinagem com: . . . . .	33



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNC	Controle Numérico Computadorizado (do inglês Computer Numeric Control)
EDM	Eletroerosão (do inglês Electrical Discharge Machining)
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
EPI	Equipamento de Proteção Individual
GLP	Plaquetas de Grafeno
ICE	Instituto de Ciências Exatas
LEO	Laboratório de Eletrônica Orgânica
LSCNC	Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomaterias de Carbono
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MG	Multicamdas de Grafeno
MQF	Mínima Quantidade de Fluido
MLQ	Mínima Quantidade de Lubrificante
MWF	Fluidos de Metal Working
NBR	Norma Brasileira aprovada pela ABNT
PANI	Nanopolímeros em Formato de Tubos
SAE	Society of Automotive Engineers
TRM	Taxa de Remoção de Material
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora

## LISTA DE SÍMBOLOS

$f$	Avanço
$l_m$	Percurso de medição
$l_t$	Percurso total de medição
$R_a$	Rugosidade média
$r_e$	Raio de ponta
$R_t$	Rugosidade total
$R_z$ ou $R_{max}$	Rugosidade máxima
RD	Relação de desgaste
$y_i$	Ordenadas de afastamento
$Z_i$	Rugosidades parciais

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>11</b>
1.1	Considerações iniciais . . . . .	11
1.2	Justificativa . . . . .	12
1.3	Escopo . . . . .	12
1.4	Objetivo . . . . .	12
1.4.1	Objetivo Geral . . . . .	12
1.4.2	Objetivo Específico . . . . .	13
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .</b>	<b>14</b>
2.1	Usinagem . . . . .	14
2.2	Torneamento . . . . .	15
2.3	Integridade Superficial . . . . .	16
2.3.1	Acabamento Superficial . . . . .	17
2.3.2	Rugosidade . . . . .	17
2.4	Fluidos de Corte . . . . .	19
2.4.1	Classificação dos Fluidos de Corte . . . . .	21
2.4.1.1	Óleos Integrais . . . . .	21
2.4.1.2	Emulsões Oleosas . . . . .	22
2.4.1.3	Soluções Oleosas . . . . .	22
2.4.1.4	Gases . . . . .	23
2.4.2	Seleção do Fluido de Corte . . . . .	23
2.4.2.1	Condições de Usinagem . . . . .	24
2.4.2.2	Material da Ferramenta . . . . .	24
2.4.2.3	Material da Peça . . . . .	24
2.4.2.4	Operação de Usinagem . . . . .	24
2.4.2.5	Máquina-ferramenta e Produção . . . . .	25
2.4.2.6	Aspectos Ecológicos . . . . .	25
2.4.2.7	Análise Econômica . . . . .	25
2.4.2.8	Recomendações dos Fabricantes . . . . .	25
2.5	Carbono e suas Formas Alotrópicas . . . . .	25
2.6	Grafeno . . . . .	26
2.6.1	Grafeno como Aditivo em Óleos Lubrificantes . . . . .	27
2.7	Casos de Sucesso . . . . .	27
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA . . . . .</b>	<b>34</b>

4	<b>RESULTADOS ESPERADOS</b> . . . . .	<b>35</b>
5	<b>CONCLUSÕES</b> . . . . .	<b>36</b>
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros . . . . .	36
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>37</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

Nos processos de fabricação de um componente, a seleção do método a ser utilizado depende de inúmeros fatores. Segundo KALPAKJIAN (1995), para selecionar qual processo utilizar, devem ser considerados o tipo de material e suas propriedades; tamanho, forma e complexidade do componente; propriedades finais desejadas; tolerâncias e acabamento superficial exigido pelo projeto; custo e projeto ferramental; sucata gerada; tempo necessário, taxa de produção e custo total do processo.

Com a evolução da tecnologia, surgiram novos cenários na indústria mecânica. Se tratando de peças únicas ou de geometrias particulares, pode-se utilizar o processo de usinagem automatizado, como o CNC (do inglês Computer Numeric Control), basicamente aplicado na usinagem de perfis de alta complexibilidade, utilizando-se controle numérico computadorizado inicialmente para produção de peças de revolução ou cilíndrica. Com este processo, é possível a utilização eficiente de toda matéria prima com um alto nível de precisão, reduzindo desperdício de material e tornando a indústria mais econômica e menos agressiva para o meio ambiente, fatores estes de extrema importância no mercado atual.

Apesar de toda automatização envolvida nas linhas de produção atuais, parâmetros essenciais como acabamento superficial do produto final são de extrema importância para se obter os padrões de qualidade exigidos pelo projeto. Assim, destacamos a rugosidade como principal parâmetro de estudo, uma vez que possui grande influência em diversas propriedades do componente a ser fabricado, interferindo não só no acabamento superficial da peça como no coeficiente de atrito entre peças, na resistência à corrosão, ao desgaste e à fadiga.

Atualmente, algumas máquinas automatizadas já possuem o controle do desgaste e da troca de ferramentas sem necessidade de interferência humana, utilizando técnicas de monitoramento em tempo real através de vibrações mecânicas, emissão acústica ou ainda através da medição de diversos parâmetros do processo relacionados ao desgaste da ferramenta e/ou acabamento superficial da peça (NUNES, 2011).

Tendo em vista que o desgaste da ferramenta de corte contribui diretamente para o aumento da rugosidade superficial da peça, este poderá ser reduzido com o uso dos fluidos de cortes. Tem-se aumentado significativamente o número de pesquisas com o objetivo de restringir ao máximo o uso de fluido refrigerante e/ou lubrificante no processo de usinagem. Os fatores importantes que justificam tais estudos incluem os custos operacionais da produção, as questões ecológicas (afetando o solo, a água e o ar), as exigências legais quanto à preservação do meio ambiente e da saúde do ser humano, entre

outros (SCHROETER et al., 2002).

## 1.2 Justificativa

O presente trabalho tem como objetivo investigar o comportamento dos principais parâmetros utilizados para expressar a rugosidade de uma peça de material aço ABNT 1045 passando pelo processo de usinagem com o fluido de corte Unix solúvel 100 e posteriormente adicionar partículas de grafeno a este fluido. A relevância deste estudo se encontra no pequeno número de informações e aplicações de grafeno em fluidos de corte, além de propriedades que podem ser descobertas com sua utilização, partindo da análise de temperatura, custo e tempo de usinagem, reaproveitamento e vida útil do fluido de corte, dentre outras. Assim, com o intuito de agregar e expandir maior conhecimento e informações nas diversas áreas de aplicação da Engenharia Mecânica, foi desenvolvido o estudo da influência da utilização de grafeno ao fluido de corte no processo de usinagem.

Considerando o cenário atual em que a Organização Mundial da Saúde (OMS) declarou estado de pandemia para a Covid-19, a Universidade Federal de Juiz de Fora teve suas atividades presenciais suspensas. Diante disso, o procedimento experimental do presente trabalho não pôde ser realizado, porém é tratado no tópico de metodologia quais seriam os métodos aplicados.

## 1.3 Escopo

O desenvolvimento do trabalho consiste na comparação dos parâmetros de rugosidade referentes ao processo de usinagem obtidos a partir da aplicação de diferentes fluidos de cortes. Para tal análise, serão apresentados: as principais características do processo de usinagem; os parâmetro de rugosidade; os tipos de fluidos de corte aplicados no processo de torneamento e os parâmetros que devem ser considerados em sua escolha, enfatizando os fluidos sólidos originados do carbono; e por fim, a análise de alguns casos encontrados na literatura referentes à utilização do grafeno em fluidos de corte. Assim, conclui-se sobre as condições adotadas para o ensaio e a real viabilidade de se utilizar grafeno em fluidos de corte.

## 1.4 Objetivo

### 1.4.1 Objetivo Geral

Analisar a influência da adição de grafeno ao fluido de corte no processo de usinagem utilizando o torno CNC. O desempenho do processo seria avaliado em termos do acabamento da superficial da peça de trabalho.

#### 1.4.2 Objetivo Específico

- Analisar os diferentes métodos empregados no processo de usinagem;
- Estudar os tipos de fluidos convencionais utilizados no processo de usinagem;
- Definir método e o fluido que será utilizado como base do estudo para posterior incrementação das partículas de grafeno;
- Analisar os resultados obtidos com o ensaio;
- Comparar e concluir sobre a influência da adição de grafeno no fluido de corte.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Defini-se um processo de fabricação como a transformação da matéria prima em produtos acabados através de diversos processos, como fundição, conformação mecânica, metalurgia do pó, soldagem e usinagem. Para se escolher um processo de fabricação adequado, deve-se considerar vários fatores, dentre eles, forma e dimensão da peça, material a ser empregado e suas propriedades, quantidade de peças a serem produzidas, tolerâncias e acabamento superficial requerido e custo do processamento. Além disso, são classificados de acordo com a remoção de cavaco, que por definição, é a porção de material removido da peça nos processos de usinagem caracterizado por apresentar geometria e formas irregulares, ou seja, não definidas (FERRARESI, 1970). Nesta seção, serão apresentados os principais conceitos relacionados ao conteúdo deste trabalho, sendo eles usinagem, torneamento, integridade superficial, rugosidade, fluidos de corte, carbono e suas formas alotrópicas e alguns casos de sucesso encontrados na literatura.

### 2.1 Usinagem

Conforme citado por MACHADO et al. (2011), a usinagem é um dos processos de fabricação mais populares do mundo responsável por empregar dezenas de milhões de pessoas em todo o Mundo. Tal fato mostra a importância desse processo e a relevância em realizar estudos sobre o assunto.

Inicialmente, define-se a usinagem como uma operação aplicada a todos os processos de fabricação onde ocorre a remoção progressiva de material sob forma de cavaco, dando forma, dimensão e/ou acabamento à peça.

A usinagem pode ser classificada de duas formas: convencional e não convencional. O processo convencional utiliza energia mecânica para a remoção de material da peça, principalmente, por cisalhamento entre a ferramenta e a peça, sendo necessário a utilização de uma ferramenta de corte mais dura que a peça a ser usinada. Divide-se em: torneamento, fresamento, furação, retificação, mandrilamento, serramento, roscamento, aplainamento, alargamento, entre outros. Já a classificação não convencional, as operações de corte utilizam outro tipo de energia, como a termoeletrônica. Nesse caso, não são geradas marcas nas superfícies da peça e a taxa de remoção de material é muito menor comparada aos processos convencionais. Assim, como não ocorre contato peça-ferramenta, a ferramenta não precisa ser necessariamente mais dura que a peça. Destacam-se os seguintes processos: jato d'água, jato abrasivo, fluxo abrasivo, ultrassom, eletroquímica, eletroerosão, laser, plasma e feixe de elétrons.

A norma ABNT NBR 6175/2015, é responsável por determinar a nomenclatura, a definição e a classificação dos processos mecânicos de usinagem. Os diversos processos existentes na usinagem convencional podem ser vistos na Figura 1.



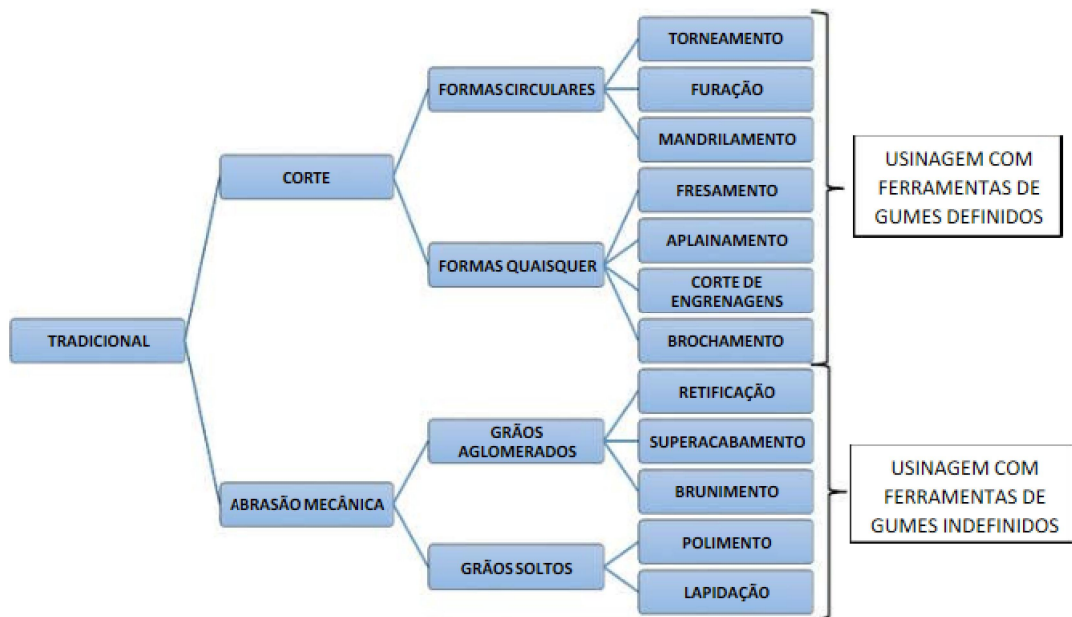


Figura 1 – Processos Tradicionais de Usinagem

Fonte: MACHADO et al. (2009)

De todos os processos de usinagem conhecidos, o torneamento é um dos mais utilizados em pesquisa na área. Apesar de se tratar de um processo imprevisível devido sua complexidade e dificuldade em se determinar as condições ideais de corte, é também simples, pois uma vez determinadas tais condições, é possível produzir peças dentro das especificações de forma, tamanho e acabamento ao menor custo possível (MACHADO et al., 2009), além da simplicidade da ferramenta utilizada e do monitoramento do processo.

## 2.2 Torneamento

Segundo FERRARESI (2006), o torneamento é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com o auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes (aquelas que possuem uma única aresta de corte), combinando o movimento de rotação da peça e o movimento de avanço da ferramenta. Em algumas aplicações, a peça se mantém estática enquanto a ferramenta gira ao seu redor. O torneamento pode ser classificado de acordo com os tipos de ferramentas utilizadas, com os dados do corte e com as operações a serem realizadas, dividindo-se em:

- Torneamento retilíneo: processo no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea, subdividindo-se em: cilíndrico, cônico, radial e perfilamento.
- Torneamento curvilíneo: processo onde a ferramenta se desloca segunda uma trajetória curvilínea, podendo ser classificado em: desbaste e acabamento.

### 2.3 Integridade Superficial

Durante o processo de usinagem, o atrito gerado entre a peça e a ferramenta ocasiona em uma grande perda de calor. Para diminuir ou dissipar parte desse calor produzido, utiliza-se os fluidos de corte. Além da capacidade da remoção desse calor gerado, o fluido pode ser utilizado como lubrificante, reduzindo o desgaste da ferramenta, ajudando na remoção dos cavacos da área usinada, protegendo as partes envolvidas da corrosão e melhorando o acabamento superficial, parâmetro este que vem se tornando extremamente importante na qualidade do produto final. O conceito de integridade superficial não se aplica somente à rugosidade da superfície ou à sua forma geométrica, engloba também, algumas alterações na superfície e em camadas internas da peça que podem ocorrer durante o processo. Segundo MACHADO et al. (2011), a análise da superfície usinada é obtida como resultado do processo de usinagem onde ocorrem deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibrações, tensões residuais e às vezes reações químicas.

Tais classificações referentes às alterações que podem ocorrer durante o processo de usinagem estão esquematizadas de acordo com a Figura 2.

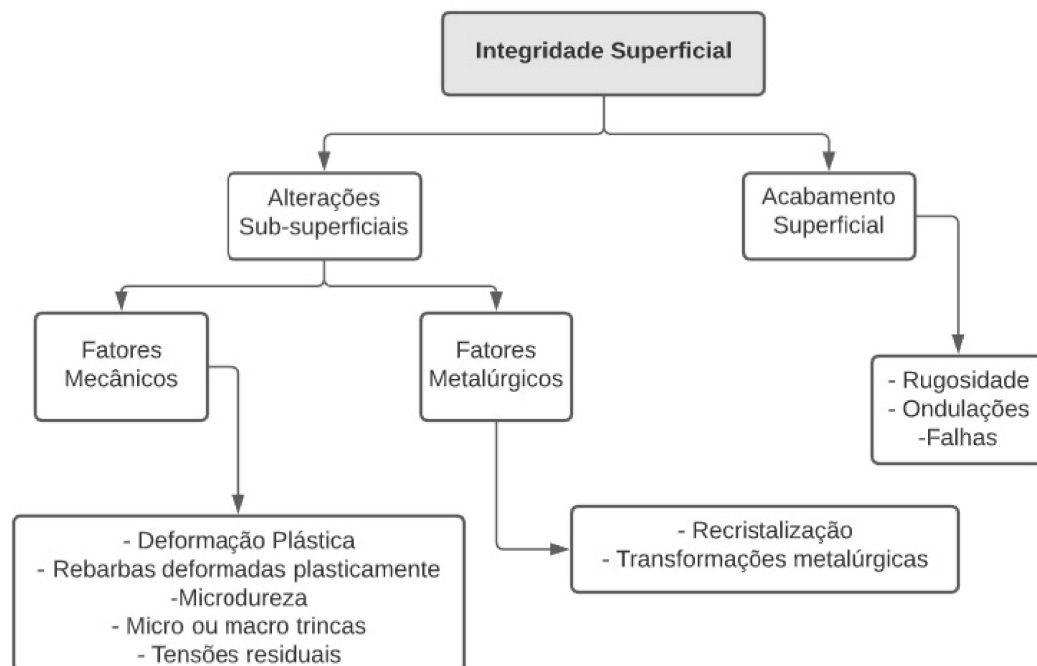


Figura 2 – Integridade Superficial

Fonte: Adaptado de MACHADO et al. (2009)

Dentre as diversas alterações citadas na Figura 2, o acabamento superficial é o parâmetro mais utilizado, pois é mais simples e fácil de ser avaliado e monitorado. Portanto, este será abordado com mais detalhes na seção 2.3.1.

### 2.3.1 Acabamento Superficial

O acabamento superficial de uma peça usinada é definido como a combinação de vários fatores, divididos em ondulações, falhas e rugosidade. As ondulações consistem de irregularidades superficiais ou de erros geométricos, podendo ser causadas por vibrações e flexões da ferramenta e/ou peça devido à força de usinagem, à temperatura de corte ou até mesmo por erro de fixação da peça ou ferramenta. Já as falhas, são definidas como interrupções na topografia típica da superfície de um peça, podendo surgir durante o processo de corte ou serem causadas por defeitos inerentes, tais como inclusões, trincas e bolhas. Esses dois fatores citados, são considerados erros de fabricação e devem portanto serem evitados no processo. Por fim, a rugosidade, que é definida por irregularidades finas ou erros microgeométricos como marcas de avanço, aresta postíça de corte e desgaste da ferramenta, é o parâmetro mais relevante dentre eles. Assim, será abordado em maiores detalhes na seção 2.3.2.

### 2.3.2 Rugosidade

Segundo KOPAC E BAHOR (1999) a superfície de uma peça apresenta de maneira geral, desvios aleatórios, saliências ou irregularidades que podem ser examinadas em termos macro (dimensões, forma e orientação) ou micro (rugosidade) geométricos. Os desvios dimensionais, de forma e de orientação são facilmente controlados e medidos graças à dependência da natureza da operação e da rigidez da máquina-ferramenta utilizada (MACHADO, 2011).

Em muitos casos, a rugosidade é utilizada como parâmetro de saída para controle do processo de usinagem. Esta depende de diversos fatores de entrada como: as propriedades do material da peça e da ferramenta, o processo de operação utilizado para usinagem e a geometria da ferramenta. Devido ao elevado número de variáveis e parâmetros que a afetam, a rugosidade pode ser classificada como o procedimento mais adequado dentre os métodos que quantificam a integridade superficial de uma peça, desempenhando um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos e relacionando a qualidade do acabamento superficial com a precisão do ajuste da máquina, das condições de usinagem e das tolerâncias de fabricação (KOPAC E BAHOR, 1999).

Existem diversos parâmetros de rugosidade utilizados para identificar as irregularidades em cada superfície de acordo com a funcionalidade da peça usinada, sendo definidos como parâmetros de amplitude, determinado através da altura de picos e/ou profundidades dos vales; parâmetros de espaço, determinado pelo espaçamento do desvio ao longo de superfície; parâmetros híbridos, definido pela combinação dos parâmetros de amplitude e de espaço (GADELMAWLA et al., 2002).

A rugosidade média, conhecida como  $R_a$ , é o parâmetro de amplitude mais utilizado

para o controle da rugosidade nas indústrias. Corresponde média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento ( $y_i$ ), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição ( $l_m$ ), conforme mostra a Figura 3. Tal parâmetro fornece um controle contínuo da rugosidade em uma linha de produção, porém, os picos e vales não são distinguidos, podendo as vezes, não dar a indicação direta do estado da superfície. Em determinadas aplicações específicas pode ser mais útil utilizar outros parâmetros de rugosidade.

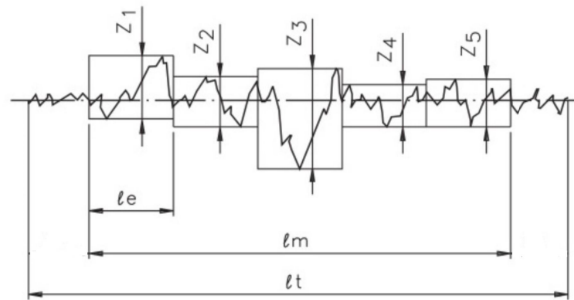


Figura 3 – Rugosidade média

Fonte: Adaptado da Aula 19

Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/ediviana/19parmetros-de-rugosidade>>. Acesso em: 7 de Set. de 2020

O parâmetro  $R_z$  ou  $R_{max}$ , denominado como rugosidade máxima, é utilizado quando se pretende determinar a altura máxima da rugosidade. É definido como o maior valor das rugosidades parciais ( $Z_i$ ) que se apresenta no percurso de medição ( $l_m$ ), informando a máxima deterioração da superfície vertical da peça. Este parâmetro é muito sensível aos picos mais altos e mais baixos da superfície e é, portanto definido como a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo do perfil avaliado, conforme representado na Figura 4 (GADELMAWLA et al., 2002).

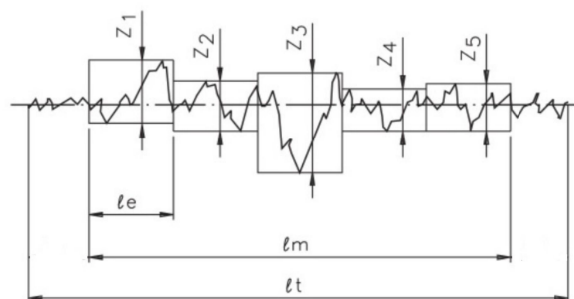


Figura 4 – Rugosidade máxima

Fonte: Adaptado da Aula 19

Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/ediviana/19parmetros-de-rugosidade>>. Acesso em: 7 de Set. de 2020

Onde  $l_t$  é o percurso total de medição.

Já o parâmetro  $R_t$  ou rugosidade total, corresponde a distância vertical entre a maior altura de um pico (corte dos picos mais altos da superfície) e a maior profundidade de um vale dentro de todo comprimento medido, independente dos valores de rugosidade parcial. Portanto, é um parâmetro com maior rigidez comparado ao  $R_z$ , pois considera o comprimento de amostra igual ao comprimento de avaliação, levando a resultados enganosos.

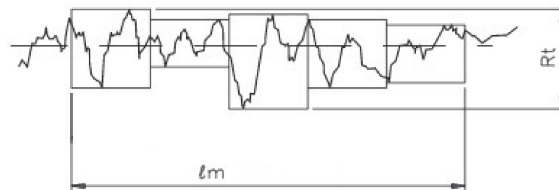


Figura 5 – Rugosidade total

Fonte: Adaptado da Aula 19

Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/ediviana/19parmetros-de-rugosidade>>. Acesso em: 7 de Set. de 2020

No processo de torneamento, se o avanço ( $f$ ) é menor que o raio de ponta ( $r_e$ ) da ferramenta, os valores de  $R_a$  e  $R_t$  são calculados, de forma aproximada pelas Equações 2.1 e 2.2, respectivamente.

$$R_{a_{teorica}} = \frac{f^2}{18\sqrt{3}r_e} \quad (2.1)$$

$$R_{t_{teorica}} = \frac{f^2}{8r_e} \quad (2.2)$$

Inúmeros outros parâmetros são definidos para medir a rugosidade, porém sua escolha depende diretamente da aplicação da peça.

## 2.4 Fluidos de Corte

De acordo com RUNGE e DUARTE (1990) e GONÇALVES (2008), os fluidos de corte são composições complexas formadas por agentes químicos que variam conforme a operação a ser executada e o tipo de metal a ser trabalhado. Os fluidos estão integrados ao processo de usinagem e fabricação de peças metálicas através da remoção de cavacos dentro do sistema que contempla a máquina-ferramenta, as ferramentas de corte, as peças em produção e o fluido de corte.

Conforme citado por FERRARESI (1970), a primeira utilização de fluido de corte se deu com o objetivo de reduzir o efeito das altas temperaturas sobre a ferramenta de

corte através da utilização de grande quantidade de água sobre a região de contato entre peça, ferramenta e o cavaco. A partir de então, diversas pesquisas foram feitas para o desenvolvimento de novos tipos de fluidos além da água, pois esta, apesar de ter um alto poder refrigerante, possui baixo poder lubrificante, além de promover oxidação da peça, da ferramenta e da máquina.

Nos dias de hoje, segundo MACHADO et al. (2004), devido à grande demanda nas indústrias, pressão de órgãos ambientais e de saúde e ao desenvolvimento na tecnologia de novos aditivos, os fluidos de corte, cada vez mais, vêm apresentando melhoria em suas propriedades e no cumprimento de suas funções. Com isso, sua utilização têm sido minimizada aplicando-se duas técnicas: corte completamente sem fluido, conhecido como corte a seco e o corte com mínima quantidade de fluido (MQF).

Basicamente, as principais funções dos fluidos de corte são de lubrificar e refrigerar. Como citado por MACHADO et al. (2004), em baixas velocidades de corte a lubrificação é importante para diminuir o coeficiente de atrito no contato ferramenta-peça e reduzir a soldagem do cavaco na ferramenta, evitando possível formação da aresta postiça de corte. Para selecionar o fluido de corte a ser utilizado como lubrificante, é necessário que este possua alta resistência a pressão e a temperaturas elevadas, e viscosidade suficientemente baixa a fim de permitir uma boa circulação do fluido e suficientemente alta para uma boa aderência do fluido às superfícies da ferramenta.

Já em altas velocidades de corte, as condições de penetração do fluido no contato ferramenta-peça são menos favoráveis. Neste caso, utiliza-se o fluido com a função de refrigerar, minimizando o desgaste, a dilatação térmica da peça e o dano térmico causado à estrutura superficial da peça. Para a escolha do fluido de corte que será utilizado como refrigerante, este deve possuir características como baixa viscosidade para facilitar sua fluidez durante o processo, capacidade de manter um bom contato térmico com o metal utilizado, além de possuir alta condutividade térmica e alto calor específico para que ocorra a retirada do calor gerado na região de corte. Com isso, obtém-se um aumento da vida da ferramenta, evita a dilatação da peça e garante uma economia no processo como um todo.

Além das capacidades de refrigeração e lubrificação já citadas, outras funções de importância exercidas pelos fluidos de corte em um processo de usinagem são mostrados por MOTTA E MACHADO (1995), como:

- Melhoria no acabamento superficial: o acabamento superficial de peças usinadas se relaciona com a força utilizada na usinagem, o que depende diretamente da qualidade da lubrificação empregada. Em baixas velocidades, os fluidos são efetivos no processo de lubrificação resultando em uma melhora no acabamento superficial.
- Evitar o aquecimento excessivo da peça: visto que o fluido tem como uma de suas principais funções controlar o aumento da temperatura no processo a fim de reduzir

os efeitos do superaquecimento da peça fabricada, com o calor gerado durante o processo de corte, podem ocorrer problemas de manuseio da peça ou até mesmo a expansão do componente fabricado o que, em algumas circunstâncias, pode levar a erros de tolerância dimensional.

- Retirada do cavaco da região de corte: em determinadas operações, o cavaco deve ser retirado da região de corte para que não comprometa o acabamento superficial da peça usinada ou ocasione avarias na ferramenta de corte. Para isso utiliza-se o fluxo de fluido de corte a alta pressão e baixa viscosidade.
- Proteção contra corrosão: este fator pode reduzir a vida útil da ferramenta e da máquina, além de comprometer a qualidade do produto final.

Para executar todas as funções acima descritas, a ação do fluido de corte consiste no seu contato na região cavaco-ferramenta, contudo, a forma como isso ocorre ainda é uma questão de muita discussão entre os pesquisadores.

#### 2.4.1 Classificação dos Fluidos de Corte

Os fluidos de corte podem ser líquidos, sólidos ou gasosos, sendo sua forma líquida aplicada à grande maioria das operações de usinagem. Dentre as diversas formas de se classificar os fluidos de corte, basicamente dividem-se em quatro grupos, sendo eles: óleo integral, fluidos de corte solúveis em água, gases e lubrificantes sólidos.

##### 2.4.1.1 Óleos Integrais

Pode-se dizer que os óleos integrais são óleos minerais puros ou com aditivos, normalmente de alta pressão. Os primeiros lubrificantes utilizados como óleos integrais na usinagem de metais foram os óleos vegetais e animais, porém, o alto custo e a rápida deterioração fizeram com que estes óleos se tornassem inviáveis. Atualmente, tanto óleos vegetais como animais são empregados como aditivos nos fluidos minerais contribuindo para a melhoria das propriedades lubrificantes. Fatores como alto custo, risco de incêndios, ineficiência em altas velocidades de corte, baixo poder refrigerante e por oferecer riscos à saúde do operador, tem feito os óleos integrais perderem espaço para os óleos emulsionáveis (MOTTA e MACHADO, 1995).

Porém, de acordo com GONÇALVES (2008), os fluidos de corte integrais se caracterizam por apresentarem maior transparência, permitindo ao operador a visualização da zona de trabalho através do fluido de corte. Isto faz com que sejam particularmente úteis durante o ajustamento da operação e no ajuste fino de operações mais delicadas.

#### 2.4.1.2 Emulsões Oleosas

Os fluidos solúveis em água nada mais é que emulsões de óleo em água compondo-se de uma pequena porcentagem de um determinado óleo emulsificável disperso em gotículas de água. Esses emulsificadores são substâncias que reduzem a tensão superficial da água e facilitam a dispersão do óleo mantendo-o como uma emulsão estável.

As emulsões podem ser divididas em (MOTTA E MACHADO, 1995; MACHADO E SILVA, 2004):

- Fluidos emulsionáveis: conhecidos erroneamente como “óleos solúveis”, estes óleos não se dissolvem em água, pois formam apenas uma emulsão ou suspensão de gotículas de óleo em água. São compostos de óleos minerais adicionados à água na proporção de 1:10 a 1:100 combinados com agentes emulgadores para garantir sua miscibilidade com a água. Para evitar os efeitos corrosivos que água proporciona, são utilizados aditivos anticorrosivos, e para evitar o desenvolvimento de bactérias e fungos utilizam-se biocidas atóxicos compatíveis com a pele humana a fim de preservar a saúde e bem estar dos operadores.
- Semissintéticos: são também formadores de emulsões e apresentam de 5 a 50% de óleo mineral nos fluidos concentrados e aditivos que se dissolvem em água, formando moléculas individuais. A grande quantidade de emulgadores comparado aos fluidos sintéticos faz com que os semissintéticos apresentem coloração menos leitosa e mais transparente, podendo ser considerado como ponto importante na escolha do fluido de acordo com o processo no qual será utilizado. Além disso, a menor quantidade de óleo mineral em relação às emulsões e a presença de biocidas geram um aumento da vida útil do fluido e reduzem os riscos à saúde humana.

#### 2.4.1.3 Soluções Oleosas

As soluções oleosas se caracterizam por serem compostos monofásicos de óleos que se dissolvem por completo em água, não havendo a necessidade de atuação dos elementos emulgadores como as emulsões, pois os compostos reagem quimicamente formando fases únicas. Os fluidos sintéticos são os representantes da classe das soluções e, segundo EL BARADIE (1996), são soluções químicas formadas por substâncias inorgânicas ou outros materiais, dissolvidos em água e que não contém óleo mineral, sendo constituídos por sais orgânicos e inorgânicos, aditivos de lubricidade, biocidas, inibidores de corrosão, entre outros.

Os sintéticos apresentam uma vida útil elevada por não serem tão suscetíveis às bactérias, reduzindo-se assim, o número de trocas de fluido da máquina. Outro ponto positivo em destaque vem de sua coloração, por serem soluções transparente permitem



uma maior visibilidade do processo de corte. Além disso, os óleos sintéticos mais comuns utilizados apresentam proteção anticorrosiva e boa refrigeração, já os mais complexos são de uso geral e possuem boas propriedades lubrificantes e refrigerantes.

#### 2.4.1.4 Gases

O ar é o mais comum fluido gasoso utilizado, presente até mesmo na usinagem a seco. O ar comprimido é utilizado para melhorar a retirada de calor e expulsão do cavaco da zona de corte. Os fluidos gasosos, com sua menor viscosidade, são mais eficientes na capacidade de penetrar até a zona ativa da ferramenta. Outros gases como o argônio, hélio, nitrogênio e dióxido de carbono também são utilizados para a refrigeração e proteção contra oxidação, porém apenas em casos específicos, visto ser esta uma usinagem pouco econômica. As vantagens deste sistema são menor consumo de óleo, o que reduz os custos e os impactos ao meio-ambiente, melhor visibilidade e melhora a vida da ferramenta. Mas em contrapartida, a capacidade de lubrificação e refrigeração são limitadas e se faz necessário um sistema de exaustão.

Na tentativa de unificar as classificações existentes, apresenta-se a Figura 6 que destaca, também, as principais composições e propriedades dos fluidos de corte.

Classificação dos fluidos de corte	Sólido	Líquido			Gasoso
		Óleos puros	Óleos emulsionáveis	Fluidos químicos	
Principais composições	Grafite e bissulfeto de molibidênio.	Óleo mineral e/ou óleo graxo (Agentes EP: cloro, enxofre e fósforo).	Óleos, água e emulsificadores (Agentes EP, antioxidantes e umectantes).	Água, sais orgânicos e inorgânicos, (Agentes EP, anticorrosivos, antioxidantes, biocidas e umectantes).	Ar, dióxido de carbono, nitrogênio e vapor.
Principais propriedades	Lubrificação.	Lubrificação, Extrema-pressão, Anticorrosão.	Boa Refrigeração, Boa antioxidação, Baixa lubrificação, Boa anticorrosão, Extrema-pressão.	Excelente Refrigeração, Baixa lubrificação, Boa anticorrosão e antioxidação, Fácil remoção, Extrema-pressão.	Refrigeração.

Figura 6 – Tipos, composição e propriedades dos fluidos de corte

Fonte: Ferraresi (1977) e Diniz (1999)

#### 2.4.2 Seleção do Fluido de Corte

Ao selecionar o fluido de corte adequado para determinada operação de usinagem é necessário se ter claro o objetivo que se deseja alcançar com a utilização do fluido de corte e levar em consireção alguns fatores que serão abordados a seguir.

#### 2.4.2.1 Condições de Usinagem

Em usinagem de condições severas (usinagem onde se tem alto avanço e profundidade e baixa velocidade de corte) e com forças de corte elevadas, é usado como fluido de corte lubrificante o óleo puro, que é aplicado nas partes em contato. Já na usinagem branda ou leve, onde há velocidade de corte alta, usa-se a emulsão, pois é necessária principalmente a refrigeração.

#### 2.4.2.2 Material da Ferramenta

A escolha de materiais para as ferramentas usadas nos processos de usinagem é muito importante para se ter sucesso na operação. Alguns destes materiais são o aço rápido, o metal duro, a cerâmica e o diamante e devem conter as seguintes propriedades, segundo FERRARESI (1977):

- Elevada dureza a quente;
- Elevada dureza a frio;
- Tenacidade;
- Resistência à abrasão;
- Estabilidade química;
- Facilidade de obtenção a preços econômicos.

Porém, nenhum material tem todas essas características, logo, é necessário listar as propriedades principais e as secundárias que se quer obter no processo.

#### 2.4.2.3 Material da Peça

Segundo FERRARESI (1977), conhecer o material da peça a ser usinada e o seu comportamento é decisivo para uma escolha correta do fluido de corte. Assim, surge o conceito de usinabilidade, que nada mais é do que a propriedade que os materiais têm de se deixarem ser usinados. Muitos fatores exercem influência na usinabilidade dos materiais como variação da composição do material da peça, o quanto deformou a frio, as propriedades mecânicas, entre outros. Os materiais da peça podem ser: aço, ferro fundido, alumínio, magnésio, cobre e níquel.

#### 2.4.2.4 Operação de Usinagem

Cada operação de corte tem objetivos e parâmetros de usinagem diferentes entre si. Sendo assim, cada processo tem o fluido de corte que mais se adequa a ele, levando-se em conta a finalidade da operação e o material da peça a ser usinada.

#### 2.4.2.5 Máquina-ferramenta e Produção

Para se chegar ao produto final, um corpo ou peça passa por diversas transformações físicas. A complexidade dessas sucessivas transformações, ou ciclo de fabricação, aliada ao tipo de produção (variedade de produtos e volume de produção) influenciam na determinação da máquina-ferramenta mais adequada ao processo e, conseqüentemente, o fluido de corte adequado.

#### 2.4.2.6 Aspectos Ecológicos

Como visto, os fluidos de corte contêm óleos e agentes químicos em suas composições, que podem causar danos ao meio ambiente. Portanto, os fluidos de corte devem ser descartados adequadamente segundo legislação ambiental existente. Além do impacto ambiental, grande parte dos fluidos possuem componentes que podem causar doenças ao ser humano. O contato do fluido com o operário pode ser feito de forma direta ou através de vapores, névoa ou subprodutos formados durante a usinagem, podendo causar problemas de pele, câncer, ou doenças pulmonares. Algumas medidas preventivas como uso de cremes protetores e a adoção de EPIs adequados podem minimizar ou eliminar o risco de contaminação do operador. (GONÇALVES, 2013)

#### 2.4.2.7 Análise Econômica

Deve-se considerar a relação custo-benefício relacionada à aquisição, ao armazenamento, ao preparo, ao manuseio e controle em serviço e o descarte do fluido de corte.

#### 2.4.2.8 Recomendações dos Fabricantes

Por fim, deve-se considerar as recomendações não apenas do fabricante do fluido de corte, mas, também, da máquina-ferramenta e da ferramenta para escolha adequada do fluido de corte.

### 2.5 Carbono e suas Formas Alotrópicas

Diversos tipos de partículas em escala micrométrica ou nanométrica podem ser adicionados ao fluido de corte. Para diferenciar a terminologia dos fluidos com partículas nanométricas dos outros convencionais, o termo nanofluido vem sendo utilizado com frequência pelos pesquisadores. Nos últimos anos, as pesquisas em nanoestruturas de carbono tem desempenhado um papel importante na ciência dos materiais. HADAD (2012) afirma que uma forma de aprimorar as propriedades do fluido de corte é adicionando partículas sólidas que alterem suas propriedades tribológicas conforme a necessidade de cada projeto. WANG et al. (2016) complementam que os fluidos e partículas sólidas podem ser combinados gerando diversas propriedades ao novo fluido, sejam elas lubrifi-

cantes ou térmicas. Ao contrário da maioria dos elementos, o carbono pode se unir de diversas maneiras formando diferentes estruturas cristalinas, que são conhecidas como formas alotrópicas ou polimorfos (BINDER, 2009; CONSONI, 2014; PIERSON, 1993). Os alótropos de carbono se dividem em grafite, diamante, fulereno, nanotubo de carbono de parede simples, nanotubo de carbono de parede múltipla e grafeno, como mostra a Figura 7. Podem apresentar grandes variações em relação às suas propriedades, enquanto o grafite é um material mole, opaco e condutor, o diamante é um dos materiais com maior dureza conhecida, transparente e isolante elétrico.

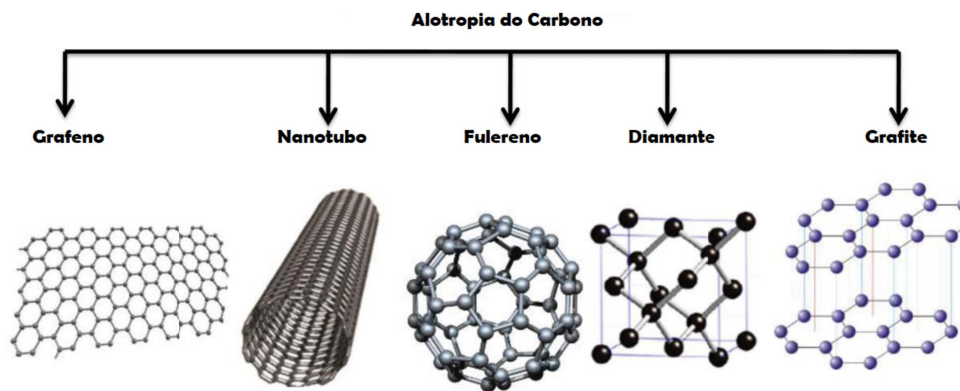


Figura 7 – Alotropia do Carbono

Fonte: Tiwari et al . (2016)

## 2.6 Grafeno

Como visto anteriormente, o grafeno é uma forma alotrópica do carbono totalmente bidimensional (2D) composto por anéis hexagonais de átomos de carbono, formando uma rede do tipo favo de mel. Ele apresenta propriedades estruturais, eletrônicas e de transporte únicas na natureza, podendo ser considerado como o único sistema bidimensional realmente genuíno na natureza. Desta forma, o grafeno entrou para o grupo de materiais de grande potencial para o desenvolvimento de novas aplicações tecnológicas.

A estrutura do grafeno foi concebida teoricamente há mais de 60 anos por Philip Russel Wallace em 1947. Porém, somente em 2004 um grupo de cientistas da Inglaterra desenvolveu um método para isolar planos de grafeno individuais sobre uma superfície de óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ). Eles tiveram sucesso em isolar o grafeno através de um processo de esfoliação mecânica da grafite com uma fita adesiva, obtendo desta forma flocos de grafeno com propriedades eletrônicas de alta qualidade.

O grafeno apresenta alta instabilidade mecânica, sendo facilmente suscetível à deformações e pode perder a sua forma planar, indo para uma estrutura amorfa (que não possui ordenação espacial a longa distância) ou se enrolando e aglomerando. Além disso, o

grafeno apresenta uma grande condutividade térmica e um maior módulo de elasticidade comparado a outros materiais (LI et al., 2008).

### 2.6.1 Grafeno como Aditivo em Óleos Lubrificantes

Estudos recentes mostram que o grafeno tem muito a oferecer como um lubrificante sólido ou aditivo para lubrificante fluido. Seu excelente desempenho como lubrificante pode ser atribuído à sua estrutura fina lamelar e a sua espessura nanométrica, o que facilita o escorregamento dos planos gerando uma baixa força de cisalhamento, e minimiza as interações entre as superfícies da ferramenta e da peça em contato. O lubrificante sólido pode ser aplicado na zona de corte em forma de pó ou misturado ao fluido de corte. Segundo Ferraresi (2006), o pó é aplicado diretamente na superfície de saída da ferramenta, antes da operação de usinagem, e as partículas lubrificantes se aderem aos sulcos da superfície de saída da ferramenta, reduzindo o atrito entre as superfícies metálicas e conseqüentemente facilitando o escorregamento do cavaco.

### 2.7 Casos de Sucesso

Pouco se sabe sobre as influências da utilização do grafeno em fluidos de corte. Grande parte dos trabalhos publicados até o momento sobre o desempenho de grafeno como aditivo em lubrificação fluida, diz respeito a óleos utilizados na indústria automotiva e esses óleos possuem viscosidade relativamente alta, o que facilita a dispersão das nanopartículas.

MELLO (2015) fez um estudo do processo de retificação de Ti6Al4V com partículas de multicamadas de grafeno dispersas em fluido sintético aplicadas via técnica MQL. Foram utilizados dois valores distintos para parâmetros de corte e variadas formas de aplicação de fluido com o objetivo de investigar, dentre os vários parâmetros, a rugosidade e integridade subsuperficial das peças. Realizou ensaios com o fluido de corte sem grafeno (apenas emulsão) aplicado pela técnica MQL e pela técnica convencional (fluido em abundância). Para todos os ensaios foi utilizado o mesmo fluido de corte, sintético ME3 emulsionável na diluição de 1:19. Em relação às multicamadas de grafeno (MG), a razão foi de 60 mg de MG para 200 mL de fluido de corte. As imagens das Figuras 8 e 9 foram obtidas por um Microscópio eletrônico de varredura (MEV) e apresentam sulcos que indicam a direção predominante das marcas ou ranhuras deixadas pela ferramenta sobre a superfície da peça. Além disso, como resultados mais expressivos, o autor observou que a presença do grafeno garantiu um melhor acabamento e menor variação na microdureza abaixo da superfície retificada em relação ao fluido sem grafeno, e também em relação ao fluido aplicado em abundância, mesmo em condições mais severas de usinagem.

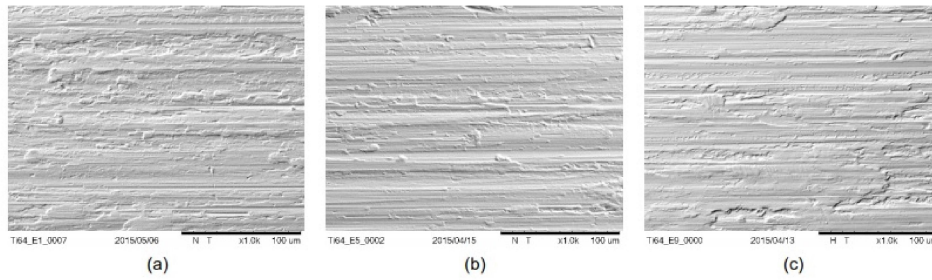


Figura 8 – Imagens de MEV, ensaios com penetração de trabalho de  $10 \mu\text{m}$ , 2 passes, utilizando (a) técnica convencional; (b) técnica MQL e; (c) técnica MQL com adição de grafeno.

Fonte: MELLO (2015)

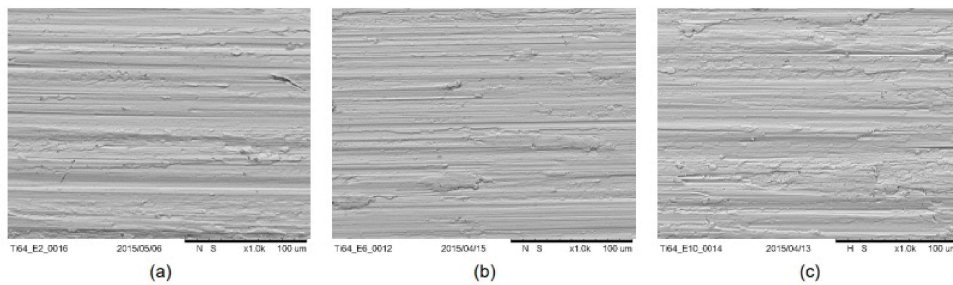
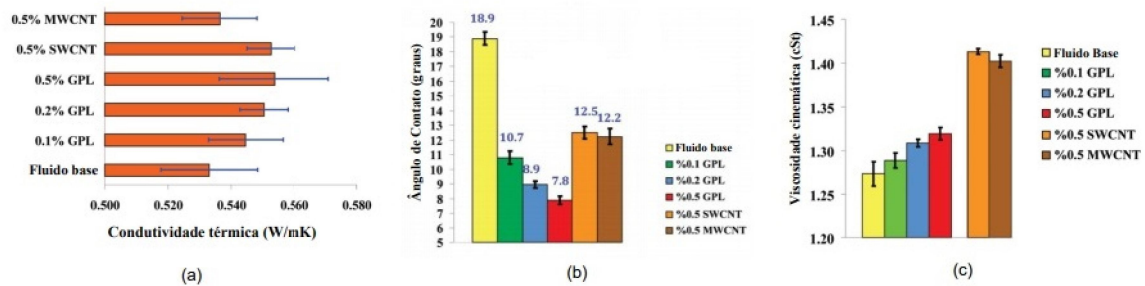


Figura 9 – Imagens de MEV, ensaios com penetração de trabalho de  $10 \mu\text{m}$ , 3 passes, utilizando (a) técnica convencional; (b) técnica MQL e; (c) técnica MQL com adição de grafeno.

Fonte: MELLO (2015)

SAMUEL et al. (2011) e CHU et. al (2013) relatam em seus estudos que a mistura de grafeno na concentração de 0,1% em peso disperso em fluido vegetal a base de canola, reduz a rugosidade das peças estudadas. No trabalho de SAMUEL et al. (2011), foram utilizadas as forças de corte e as temperaturas de corte como medidas de usinabilidade para fins de comparação para seu estudo feito em suspensões coloidais de grafeno como fluidos metalúrgicos semi-sintéticos de alto desempenho. As temperaturas de corte foram medidas usando um termopar e cargas de plaquetas de grafeno (GPL) de 0,1, 0,2 e 0,5% em peso foram adicionadas ao fluido de corte base para criar três formulações de MWFs (fluidos de metal working) aprimorados com grafeno. Os resultados são interpretados através do ângulo de contato da ferramenta, condutividade térmica e alterações na viscosidade cinemática que ocorrem com a adição comparado ao fluido convencional (Figuras 10). Assim, chegou a conclusão de que as plaquetas de grafeno melhoram o desempenho de resfriamento e lubrificação dos MWFs sem comprometer num aumento significativo na viscosidade do fluido. Além disso, revelam que a adição de grafeno melhora as capacidades de lubrificação e de dissipação de calor do fluido de corte de base, e a condutividade térmica do fluido de corte aumenta com o aumento do teor de grafeno. Por fim, mostraram que as forças de corte e as temperaturas de corte diminuem com o aumento do teor de

grafeno no MWF, sendo explicado pela melhor molhabilidade conseguido com o grafeno e sua maior capacidade de penetrar na interface cavaco-ferramenta.



Onde:

- MWF (*metal working fluid*) - Fluido de corte
- GPL (*graphene platelets*) - Placas de Grafeno;
- SWCNT (*single-walled carbon nanotubes*) - Nanotubos de carbono de parede simples;
- MWCNT (*multiwalled carbon nanotubes*) - Nanotubos de carbono de paredes múltiplas.

Figura 10 – Resultados para diferentes materiais e concentrações de nanopartículas dispersas no fluido de corte, relacionado-os com:

(a) Condutividade Térmica; (b) Ângulo de Contato e; (c) Viscosidade Cinemática

Fonte: SAMUEL et al. (2011)

RAMON-RAYGOZA et al., (2016) realizaram ensaios tribológicos para verificar a influência de partículas sólidas (multicamadas de grafeno, multicamadas de grafeno com nano cobre esférico (denominado Cu) e multicamadas de grafeno com nano polímeros em formato de tubos (denominado PANI), adicionadas em óleo lubrificante para motor de combustão interna (SAE 25 W-50) em aplicações automotivas. Os autores testaram 6 condições diferentes utilizando os três lubrificantes sólidos em duas concentrações diferentes, 0,5 % e 2%, em peso. Verificaram que, para o caso do óleo com multicamadas de grafeno houve redução no coeficiente de atrito para a concentração 2,0% em peso, em torno de 5%, enquanto que um aumento de 2,8% no coeficiente de atrito foi obtido para a concentração de 0,5%. Os autores afirmam que o aumento no coeficiente de atrito com a baixa concentração de multicamadas de grafeno foi devido à pequena dimensão (10 nm) destas camadas. Eles apontam que não foi possível formar uma tribocamada na interface para que o atrito fosse reduzido. Já para a concentração de 2,0% em peso, esta camada teria sido formada e o deslizamento das camadas de grafeno (uma sobre a outra) seria o motivo da redução do coeficiente de atrito. Os autores informaram que a redução utilizando a mistura multicamadas de grafeno e Cu, ocorreu porque as nanopartículas de cobre permitem a formação de tribo-camadas mais espessas do que às formadas apenas por grafeno. A relação do grafeno-PANI teve o mesmo efeito de aumento da camada, porém sendo um pouco menos espessa devido à sua menor dureza e resistência quando comparado ao cobre.

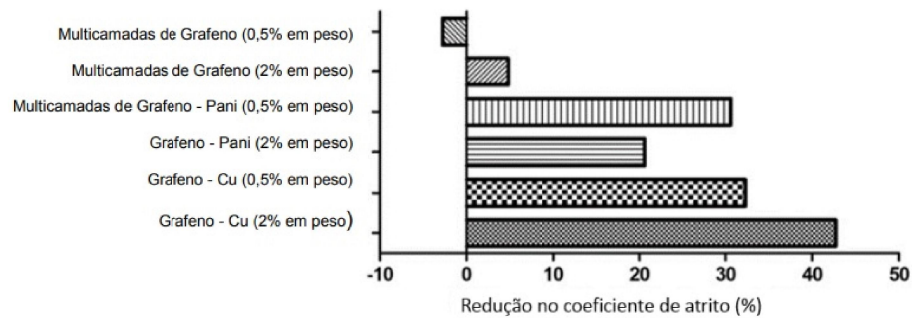


Figura 11 – Redução percentual do atrito em aplicação automotiva do uso de multicamadas de grafeno adicionado em função da concentração e tipo de aditivo

Fonte: Adaptado de RAMONRAYGOZA et al., 2016

Napolitano et al. (2019) fizeram um estudo sobre o efeito da adição de grafeno em fluido dielétrico utilizando EDM (Electrical Discharge Machining ou Eletroerosão) em aço rápido ABNT M2. O trabalho tem como objetivo otimizar os parâmetros experimentais em termos da integridade superficial relacionando a taxa de remoção de material (TRM), a relação de desgaste (RD) e a qualidade superficial do processo (Ra, Rz e Rt). Foram utilizados nanofluidos compostos da adição de nanopartículas de grafeno ao fluido dielétrico empregado no processo de usinagem. Ao fim do trabalho, chegou-se à conclusão de que a adição de nanopartículas de grafeno ao fluido dielétrico permitiu um aumento da TRM (Figura 12), porém não se mostrou significativo visto que ficou entre 0,6% e 1,75%. Por outro lado, a concentração de resíduos acarreta na melhora da TRM até uma concentração ideal, depois volta a diminuir devido ao efeito de dispersão das descargas elétricas com a diminuição considerável do tempo de usinagem.

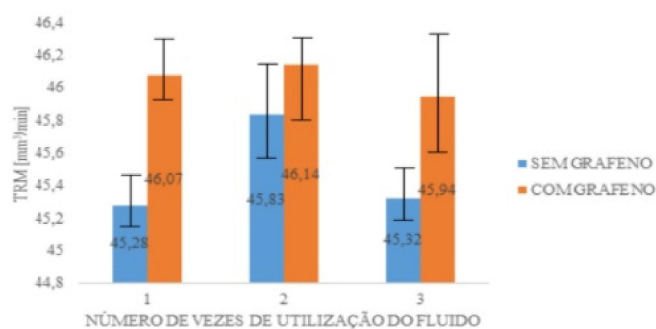


Figura 12 – TRMs do processo de EDM com e sem adição de grafeno ao fluido dielétrico.

Fonte: Napolitano et al. (2019)

Na Figura 13, observa-se que a relação de desgaste não se comporta de maneira inversamente proporcional à taxa de remoção de material nas primeiras utilizações do



fluido como esperado, mostrando a grande importância de estudo e pesquisa na área. O autor explica que tal efeito pode ter ocorrido devido à impregnação de partículas de grafeno na ferramenta, aumentando assim, sua condutividade elétrica.

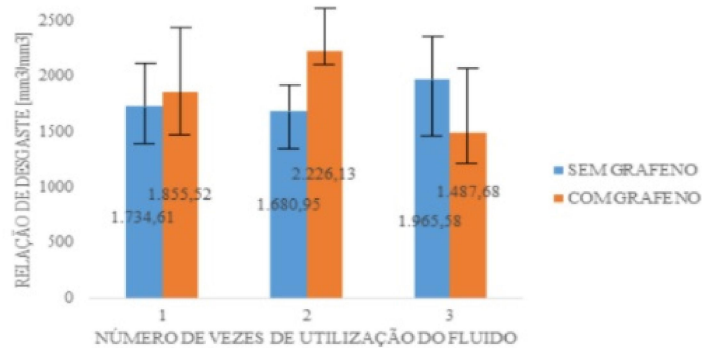


Figura 13 – RDs do processo de EDM com e sem adição de grafeno ao fluido dielétrico.

Fonte: Napolitano et al. (2019)

Já os parâmetros Ra e Rt, não se pode afirmar que a adição de nanopartículas de grafeno ao fluido afetam efetivamente para melhoria do acabamento superficial. Porém, de acordo com Benedict (1987) um aumento na TRM e/ou da RD, levaria a uma piora no acabamento superficial da peça em estudo. Porém, neste caso, o parâmetro de rugosidade permaneceu praticamente inalterado (Figura 14). Já o parâmetro Rz apresentou um pequeno aumento quando utilizado o grafeno ao fluido de corte, porém esta progressão vai diminuindo a cada utilização do fluido, uma vez que a concentração de resíduos dos fluidos com e sem nanopartículas de grafeno vai aumentando (Figura 15).

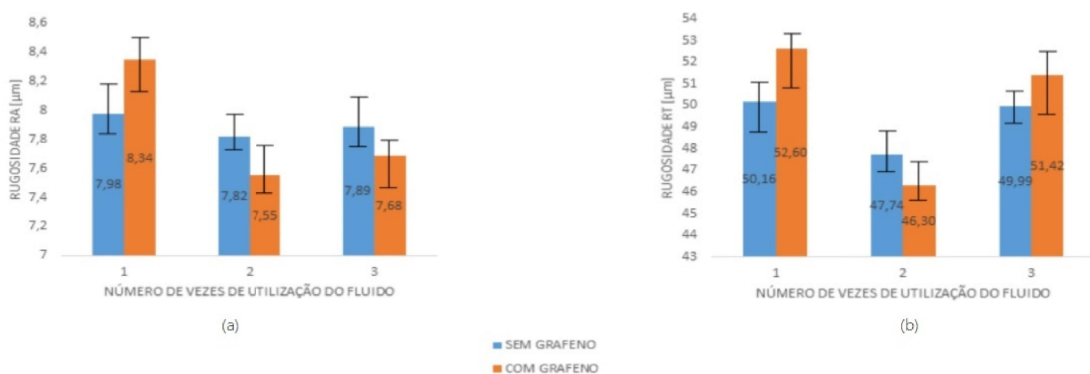


Figura 14 – Rugosidade das peças usinadas com e sem adição de grafeno ao fluido dielétrico

(a) Ra e (b) Rt.

Fonte: Napolitano et al. (2019)

CUNHA (2016) estudou a influência na temperatura de usinagem e formação de rebarba com a utilização do grafeno adicionado ao fluido de corte no processo de

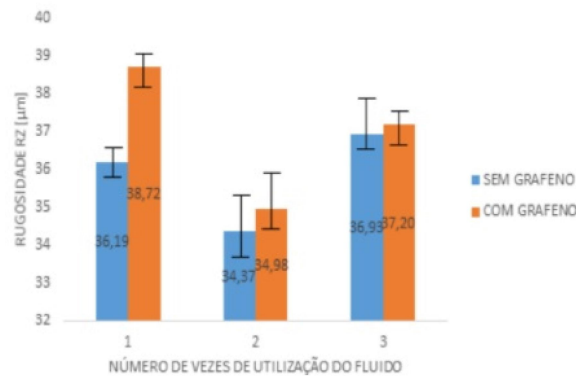


Figura 15 – Rugosidade Rz das peças usinadas com e sem adição de grafeno ao fluido dielétrico.

Fonte: Napolitano et al. (2019)

microfresamento. Foram utilizados diferentes valores de avanço e velocidade de corte, e diferentes fluidos de corte (VASCO 1000 e óleo sintético) em suas diversas formas de aplicação. Em sua tese, dentre os diversos parâmetros analisados como superfície usinada e altura de rebarba, a temperatura de usinagem foi avaliada através de termopares. Chegou-se a conclusão de que o fluido VASCO 1000 utilizado apresenta propriedades refrigerantes melhores comparado ao óleo sintético, porém, piores propriedades lubrificantes. Todos os resultados analisados na usinagem com VASCO 1000 adicionado com grafeno não apresentam visualmente nenhuma variação se comparados os resultados com a usinagem utilizando-se VASCO 1000 (Figura 16(a) e (b)). Já com a adição do grafeno ao óleo sintético, observa-se valores reduzidos nas temperaturas medidas (Figura 16(c) e (d)). Pelo fato de possuir boas propriedades térmicas de condução de calor, o grafeno pode ser responsável por absorver parte do calor gerado pelo processo. Por fim, concluiu-se também, que a utilização do fluido de corte para lubrificação ou refrigeração possui uma influência maior do que a variação dos parâmetros de corte.

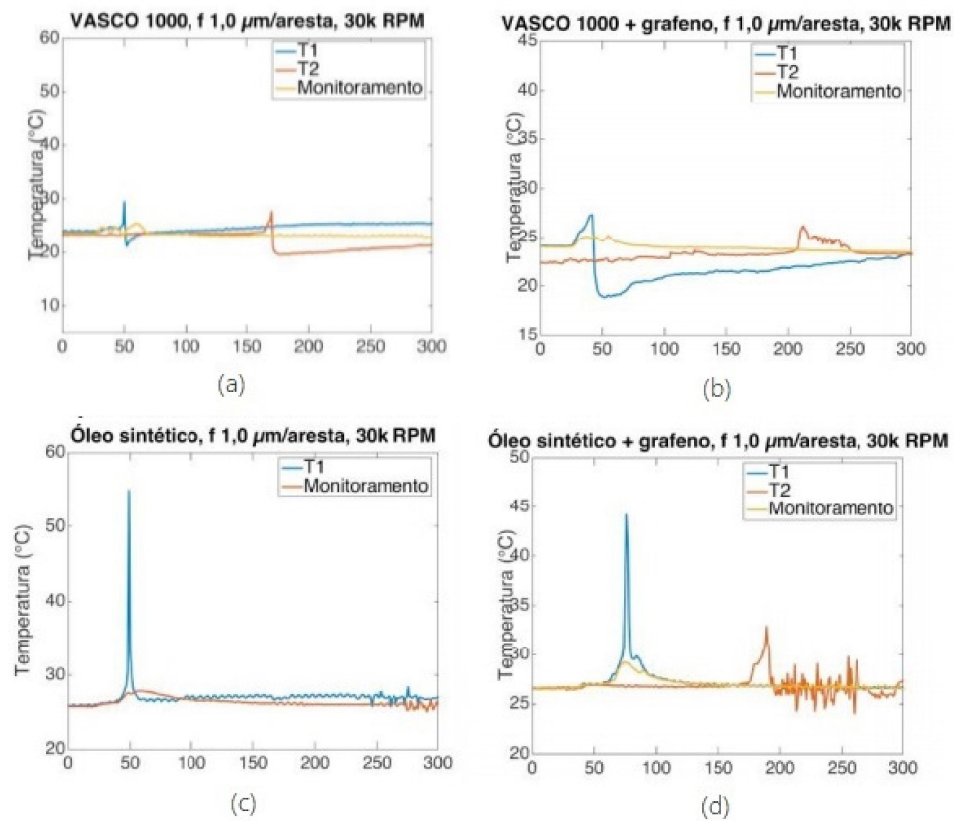


Figura 16 – Resultados de medição de temperatura na usinagem com:

(a) VASCO 1000; (b) VASCO 1000 adicionado com grafeno; (c) Óleo sintético; e (d) Óleo sintético adicionado com grafeno

Fonte: CUNHA (2016)

Diante dos resultados promissores sobre a utilização de grafeno disperso em fluido de corte, este foi escolhido para ser aplicado nos ensaios de torneamento do presente trabalho.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os materiais, ferramentas, equipamentos e planejamentos que seriam utilizados nos testes para investigar a influência da utilização do grafeno no fluido de corte no processo de torneamento da liga de aço 1045, utilizando ferramentas de metal duro. Com isso, seria possível obter comparações relacionadas ao acabamento superficial da peça e análises de outros fatores relacionados ao processo. Os ensaios de usinagem seriam realizados em parceria com o Departamento de Física da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) nos Laboratório de Eletrônica Orgânica (LEO) junto ao Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais de Carbono (LSCNC) situado no Instituto de Ciências Exatas (ICE).

Com 0,45% de carbono em sua composição, o aço SAE 1045 é classificado como aço de médio teor de carbono com boas propriedades mecânicas e boa tenacidade. Além disso, possui uma boa usinabilidade e soldabilidade quando laminado a quente, apresentando baixo custo e uma boa resistência. O percentual de carbono é relevante para a escolha do material, pois quanto maior o percentual de carbono maior dureza o aço apresenta.

Portanto, é utilizado na fabricação de componentes de uso geral onde seja necessária uma resistência mecânica superior à dos aços de baixo carbono convencionais como eixos, pinos, cilindros, parafusos, pregos, grampos, braçadeiras, pinças, colunas, entre outros. Assim, devido às vantagens já citadas, o aço SAE 1045 foi escolhido como material base para o presente estudo.

Para o ensaio, seria utilizado o lubrificante aditivado para usinagem Unix solúvel 100, fabricado pela Ingrax, aplicado puramente pelo sistema de jorro da própria máquina como solução de fluido de corte. E como lubrificante sólido, seriam utilizadas partículas de grafeno. Além disso, seria fornecido pelo LEO e LSCNC, o torno CNC e a ferramenta de corte.

A ideia inicial seria manter o raio de ponta da ferramenta e realizar diversos ensaios com diferentes avanços. Através destes ensaios realizados, seriam coletadas medições de rugosidade utilizando um rugosímetro em cada corpo de prova usinado com os dois fluidos de corte (sem e com adição de grafeno). Para análise, seriam comparados os resultados obtidos experimentalmente para ambos os fluidos, além de comparar com os valores teóricos vistos na seção 2.3.2.

## 4 RESULTADOS ESPERADOS

Como visto em diversos casos em que utilizam-se grafeno como aditivo em fluidos de corte, ao comparar um fluido de corte base com o mesmo fluido adicionando o lubrificante sólido no processo de torneamento em termos de acabamento superficial e rugosidade, espera-se obter uma melhora significativa no resultado final da peça. Além das vantagens já citadas anteriormente sobre o grafeno, como sua boa condutividade térmica, vale ressaltar a importância do estudo da sua utilização em fluidos de corte com o intuito de melhorar o acabamento superficial e a qualidade do produto usinado.

## 5 CONCLUSÕES

Os diversos estudos e pesquisas sobre a utilização de nanoestruturas de carbono tem aumentado significativamente no cenário atual. Porém, pouco se sabe sobre sua utilização em fluidos de corte. O mercado de lubrificantes apresenta uma vasta gama de aditivos utilizados para completar as propriedades da base(óleo sem aditivos). A presença de elementos químicos nocivos nos aditivos comerciais tem induzido pesquisadores a estudarem novos materiais com o intuito de substituí-los, a fim de obedecer às normas de proteção ao meio ambiente, bem como de aumentar a eficiência e o tempo de vida útil dos lubrificantes. Assim, os nanomateriais se destacam justamente por possuírem dimensões nanométricas que permitem a eles atuar diretamente na área do contato e reduzir assim, os impactos gerados no processo.

Como visto, de acordo com os resultados encontrados em pesquisa, pode-se concluir que o grafeno adicionado ao fluido de corte pode influenciar em diversas propriedades, tanto lubrificantes como térmicas, devido sua alta instabilidade mecânica e condutividade térmica. Além disso, observou-se que a presença do grafeno garante melhor acabamento na peça comparado ao fluido sem grafeno.

### 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Investigar a utilização de grafeno no fluido de corte no processo de torneamento do aço 1045.
- Avaliar qual a melhor concentração de grafeno a ser adicionado ao fluido de corte convencional.
- Avaliar a influência do grafeno em termos de componentes da força de usinagem, temperatura de corte e rugosidade superficial.
- Analisar a viabilidade econômica da adição de grafeno ao fluido convencional no processo de torneamento para diferentes tipos de ligas e ferramentas de corte.
- Investigar a vida e reaproveitamento do fluido de corte com a utilização do grafeno.
- Investigar a utilização de lubrificantes sólidos no torneamento do aço 1045, aplicando a técnica MQF.

## REFERÊNCIAS

- [1] ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas); NBR 6175: “A importância dos Processos mecânicos de usinagem”, Rio de Janeiro, 2015.
- [2] CHU, B.; SINGH, E.; KORATKAR, N.; SAMUEL, J. Graphene-enhanced environmentally-benign cutting fluids for high performance micro-machining application. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 13, p. 5500-5504, 2013.
- [3] CUNHA, Daniel Fernandes da et al. Influência da utilização do fluido de corte com adição de grafeno na temperatura de usinagem e formação de rebarba no processo de microfresamento. 2016.
- [4] EL BARADIE, MA Fluidos de corte: Parte I. caracterização. *Jornal da tecnologia de processamento de materiais* , v. 56, n. 1-4, pág. 786-797, 1996.
- [5] FERRARESI, Dino. Usinagem dos metais . Editôra Edgard Blücher, 1970.
- [6] FERRARESI, Dino. Fundamentos da usinagem dos materiais. São Paulo: Ed Edgard Blucher Ltda, v. 751, 1977.
- [7] FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais, 12<sup>a</sup> ed. São Paulo; Edgard Blucher, 2006. 751p.
- [8] GADELMAWLA, ES et al. Parâmetros de rugosidade. *Journal of Materials Processing Technology* , v. 123, n. 1, pág. 133-145, 2002.
- [9] GONÇALVES, Penha Suely de Castro. Boas práticas ambientais na utilização de fluidos de corte nos processos de usinagem. 2008.
- [10] GONÇALVES NETO, L. M., Aplicação de fluido de corte em quantidades reduzidas para usinagem do aço SAE 52100 no processo de retificação centerless de passagem. 2013. 130 f. Tese de Doutorado – Universidade Estadual Paulista, Bauru.
- [11] HADAD, M. J., TAWAKOLI, T., SADEGHI, M. H., SADEGHI, B. Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-MQL grinding process. *International Journal of Machine Tools Manufacture*. v. 54-55 , p. 10-17, 2012.
- [12] KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, S. *Manufacturing engineering and technology*, 1995. Addison-Wesley Publishing Company Inc , p. 794, 1992.
- [13] KOPAČ, Janez; BAHOR, Marko. Interaction of the technological history of a work-piece material and the machining parameters on the desired quality of the surface roughness of a product. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 92, p. 381-387, 1999.
- [14] LI, Xiaolin et al. Semicondutores de nanofibra de grafeno quimicamente derivados, ultrasuaves. *ciência* , v. 319, n. 5867, pág. 1229-1232, 2008.
- [15] MACHADO, Á. R.; SILVA, M. B. da. *Usinagem dos Metais*. 8. ed. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2004.
- [16] MACHADO, A.R.; Da Silva, M. B.; Coelho, R. T; Abrão, A. M.- “Teoria da Usinagem dos Materiais”. 1<sup>a</sup> ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

- [17] MACHADO, A. R. et al. Teoria da Usinagem dos Materiais [Theory of Materials' Machining]. 2011.
- [18] MELLO, Antonio Vitor de. Peripheral surface grinding of Ti-6Al-4V with graphene nanoplatelets dispersed in cutting fluid. 2015. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.
- [19] MOTTA, M. F.; MACHADO, A. R. Fluidos de corte: tipos, funções, seleção, métodos de aplicação e manutenção. Revista Máquinas e Metais, n. 356, p. 44-56, 1995.
- [20] NAPOLITANO, Tiago; Luciano Antônio Fernandes; Rogério Valentim Gelamo; Raphael Silva Lins. Efeito da Adição de Grafeno em Fluido Dielétrico Utilizando EDM em Aço Rápido ABNT M2. 2019.
- [21] NUNES, L. T. Análise Estatística da Unfluência dos Parâmetros de Corta na Rugosidade no Torneamento do Aço Microligado DIN38MNSIVS5. 2011 . 143 páginas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- [22] RAMÓN-RAYGOZA, E. D. et al. Development of nanolubricant based on impregnated multilayer graphene for automotive applications: Analysis of tribological properties. Powder Technology, v. 302, p. 363-371, 2016.
- [23] SAMUEL, J.; RAFIEE, J.; DHIMAN, P.; YU, Z.-Z; KORATKAR, N. Graphene Colloidal Suspensions as High Performance Semi-Synthetic Metal-Working Fluids. The Journal of Physical Chemistry C, ACS Publications, vol. 115, p. 3410-3415, 2011.
- [24] SCHROETER, R.B.; MARKUS, W.; TEIXEIRA, C. R. Eliminação e minimização do fluido de corte utilizando pastilhas de metal duro revestidas com TiN. Brasil: Máquinas e Metais, Ano XXXVIII, 2002. p.108-117. v.432.