

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

CLEBER ALVES DA SILVA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ESFEROIDIZAÇÃO NA USINABILIDADE DO AÇO  
SAE 4140.

Jaraguá do Sul, SC

Junho de 2019

CLEBER ALVES DA SILVA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ESFEROIDIZAÇÃO NA USINABILIDADE DO AÇO  
SAE 4140.

Trabalho de conclusão de Curso Superior em Tecnologia em Fabricação Mecânica, do Campus Jaraguá do Sul, Rau, do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Tecnólogo em Fabricação.

Orientador: Tiago da Silva

Jaraguá do Sul, SC

Junho de 2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
por meio do programa de geração automática do câmpus Rau, do IFSC

Silva, Cleber Alves da  
**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ESFEROIDIZAÇÃO NA USINABILIDADE  
DO AÇO SAE 4140. / Cleber Alves da Silva ; orientação  
de Tiago da Silva. Jaraguá do Sul, SC, 2019.**  
47 p.

**Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal  
de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul -  
Rau. Tecnologia em Fabricação Mecânica. .  
Inclui Referências.**

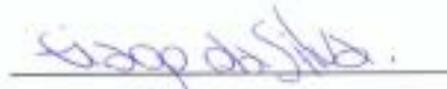
**1. Aço SAE 4140.. 2. Esferoidização. 3. Usinabilidade.  
4. Desgastes. 5. Rugosidade. I. Silva, Tiago da.  
II. Instituto Federal de Santa Catarina. . III. Título.**

CLEBER ALVES DA SILVA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ESFEROIDIZAÇÃO NA USINABILIDADE DO AÇO  
SAE 4140

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Tecnólogo em  
Fabricação Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de  
Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo  
indicada.

Jaraguá do Sul, 19 de junho de 2019



Prof. Me. Tiago da Silva

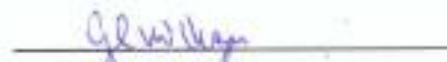
Orientador

IFSC – Campus Jaraguá do Sul – RAU



Prof. Me. Alexandre Zammar

IFSC – Campus Jaraguá do Sul – RAU



Prof. Dr. Gil Magno Portal Chagas

IFSC – Campus Jaraguá do Sul – RAU

“Os livros não são feitos para que alguém acredite neles, mas para serem submetidos à investigação. Quando consideramos um livro, não devemos perguntar o que diz, mas o que significa.” (Umberto Eco)

## **AGRADECIMENTOS**

Deixo meus agradecimentos primeiramente a Deus, aos meus professores, e também a minha família que sempre me apoiaram nos momentos que mais precisei.

O que as suas mãos tiverem que fazer,  
que o façam com toda a sua força,  
pois na sepultura, para onde você vai,  
não há atividade nem planejamento,  
não há conhecimento nem sabedoria.

(Eclesiastes: 9.10)

## RESUMO

O trabalho trata de fazer um estudo da influência da esferoidização na usinabilidade do aço SAE 4140, na avaliação ao desgaste de flanco e ponta dos insertos, e a rugosidade da superfície usinada, no torneamento CNC, com os parâmetros estabelecidos, com inserto de TNMG 160404R – ZC de classe P10-P30. O estudo busca entender qual a importância da influência do tratamento de esferoidização, no processo de usinagem, para obter um menor desgaste de ferramenta, e melhor acabamento na rugosidade do aço SAE 4140. A análise dos resultados no que tange ao desgaste das ferramentas, foi realizada com microscopia óptica e eletrônica, procurando, desta forma, estratificar os tipos de mecanismo responsável pelo desgaste das ferramentas. Foram avaliados os desgastes de ponta e de flanco, nos tempos de corte de 5 e 16 minutos. Aonde o desgaste de ponta para o material esferoidizado, foi menor nos dois ensaios. Para desgaste de flanco avaliado, no tempo de corte de cinco minutos, foi maior do que o material sem esferoidização. Por hipótese, pode-se que, pelo mecanismo de aresta postiça, formação de cavaco ou diferença da ferramenta, possa ter influenciado no menor desgaste para ferramenta, que usinou o material sem esferoidização. O trabalho abordou também o comportamento da rugosidade, no parâmetro Ra, aonde foi possível notar que a rugosidade do corpo de prova com e sem esferoidização, foram equivalentes até o tempo de corte de 15 minutos, e após 16 minutos, o material sem esferoidização subiu sua rugosidade consideravelmente, enquanto o esferoidizado manteve a rugosidade sem muitas alterações até o tempo de corte de 19 minutos.

Palavras-Chave: Aço SAE 4140. Esferoidização. Usinabilidade. Desgastes. Rugosidade.

## ABSTRACT

The work tries to make a study of the influence of spheroidization on the machinability of the SAE 4140 steel, on the evaluation of flank and tip wear of the inserts, and the roughness of the machined surface in CNC turning with the established parameters with insert of TNMG 160404R - ZC of class P10-P30. The study tries to understand the importance of the influence of the spheroidization treatment in the machining process, to obtain a lower tool wear, and better finishing in the roughness of SAE 4140 steel. The analysis of the results regarding tool wear was performed with optical and electron microscopy, in order to stratify the types of mechanism responsible for tool wear. We evaluated the tip and flank wear, and cut times of 5 and 16 minutes. Where the tip wear for the spheroid material was lower in both tests. For flank wear evaluated, at the five-minute cutting time, it was higher than the non-spheroid material. By hypothesis, it is possible that, due to the mechanism of edge posture, chip formation or tool divergence may have influenced the less wear for tool, which machined the material without spheroidization. The work also discussed the roughness behavior, in the parameter Ra, where it was possible to note that the roughness of the specimen with and without spheroidization were equivalent until the cut time of 15 minutes, and after 16 minutes the material without spheroidization increased its roughness considerably, while the spheroidized, maintained the roughness without many changes until the cutting time of 19 minutes.

Keywords: Steel SAE 4140, Spheroidization, Machining, Wear, Roughness.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desgaste de flanco.....	18
Figura 2 - Desgaste de entalhe.....	18
Figura 3 - Desgaste de cratera.....	19
Figura 4 - Deformação plástica do gume de corte.....	19
Figura 5 - Lascamentos.....	20
Figura 6 - Trincas.....	21
Figura 7 - Quebras.....	21
Figura 8 - Certificado de composição química do aço SAE 4140.....	29
Figura 9 - Ciclos térmicos utilizados para o processo de recozimento de esferoidização.....	31
Figura 10 - Fluxograma para as estampas de materiais e métodos.....	32
Figura 11 - Barra cilíndrica de aço SAE 4140.....	33
Figura 12 - Certificado de tratamento de esferoidização.....	33
Figura 13 - Figura (A) micrografia do aço SAE 4140 com esferoidização, e a (B) sem esferoidização.....	34
Figura 14 - Torno ROMI GL240.....	35
Figura 15 - Inserto utilizado para ensaio de usinabilidade.....	35
Figura 16 - Rugosímetro digital portátil, modelo TR220.....	38
Figura 17 - Análise dos desgastes no estereoscópio.....	38
Figura 18 - Gráfico do comportamento da rugosidade na usinagem.....	39
Figura 19 - Gráfico do comportamento no desgaste de ponta.....	41
Figura 20 - Desgaste de ponta. Figura (A) com esferoidização e (B) sem esferoidização para análise de 5 minutos T.C Figura (C) com esferoidização e (D) sem esferoidização para análise de 16 minutos.....	42
Figura 21 - Gráfico do comportamento no desgaste de flanco para 5 e 16 minutos.....	43
Figura 22 - Desgaste de ponta. Figura (A) com esferoidização e (B) sem esferoidização para análise feita de 5 minutos. Figura (C) com esferoidização e (D) sem esferoidização para análise feita de 16 minutos.....	44
Figura 23 - Imagem (A) material sem esferoidização, imagem (B) material com esferoidização.....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Principais tipos de desgastes, causas e ações para correção.....	24
Tabela 2 – Descrição dos parâmetros de corte utilizados.....	36
Tabela 3 – Tabela para coleta de dados no ensaio.....	37
Tabela 4 – Rugosidades.....	40

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina.

SAE – (Society of Automotive Engineers - EUA).

AISI – Sistema americano para a classificação dos aços (American Iron and Steel Institute).

ISO – International Organization for Standardization, ou Organização Internacional para Padronização, em português.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu\text{m}$  – Micrómetro (unidade de medida)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>16</b>
1.1.1	Objetivo geral.....	16
1.1.2	Objetivo específico.....	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEORICA.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Desgaste e vida da ferramenta.....</b>	<b>17</b>
2.1.1	Critério de vida da ferramenta.....	25
2.1.2	Como expressar a vida da ferramenta.....	26
<b>2.2</b>	<b>Fluido de corte lubri-refrigeração.....</b>	<b>27</b>
<b>2.3</b>	<b>Aço SAE 4140.....</b>	<b>27</b>
2.3.1	Características.....	27
2.3.2	Principais aplicações do aço 4140.....	29
<b>2.4</b>	<b>Usinabilidade aço SAE 4140.....</b>	<b>29</b>
<b>2.5</b>	<b>Tratamento de esferoidização.....</b>	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAS E MÉTODOS.....</b>	<b>32</b>
<b>3.1</b>	<b>Corpo de prova.....</b>	<b>32</b>
<b>3.2</b>	<b>Definição dos parâmetros.....</b>	<b>34</b>
<b>3.3</b>	<b>Ensaios.....</b>	<b>36</b>
<b>3.4</b>	<b>Medição dos resultados.....</b>	<b>37</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>39</b>
<b>4.1</b>	<b>Rugosidade.....</b>	<b>39</b>
<b>4.2</b>	<b>Desgaste da ferramenta.....</b>	<b>41</b>
4.2.1	Desgaste de ponta.....	41
4.2.2	Desgaste de flanco.....	42
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>46</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>47</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A usinabilidade depende do estado metalúrgico da peça, da dureza, das propriedades mecânicas do material, de sua composição química, das operações anteriores efetuadas sobre o material (sejam a frio ou quente) e do eventual encruamento (DINIZ 2013).

Conforme Trent e Right (2000), a usinagem é o processo de fabricação mais utilizado na indústria metal mecânica, com custos superiores a 15% do valor de todos os produtos manufaturados entre os países industrializados.

Por esta exigência de mercado, existe a necessidade de buscar através de estudos e experimentos melhorias para o acabamento superficial, pois superfícies dos componentes mecânicos devem se adequar a cada função. Dentro deste contexto, este trabalho propôs a realização de ensaios experimentais para avaliar a rugosidade e desgaste nos corpos de provas cilíndrica de SAE 4140.

Segundo Ferraresi (1970), podemos entender como operações de usinagem aquelas que ao conferir a forma, ou as dimensões ou acabamento, ou ainda as combinações destes três itens produzem cavaco. A usinagem tem ainda a peculiaridade de ser um processo essencialmente prático, e que envolve um elevado número de variáveis.

Cada tipo de material tem fatores que influenciam diretamente na usabilidade dos materiais, e um desses fatores é a composição química do material. No caso do trabalho em questão, o foco do estudo será a usinagem do aço SAE 4140, usando uma única velocidade de corte e avanço, com a ferramenta de TNMG 160404R – ZC de classe P10-P30.

Portanto a pergunta norteadora deste projeto foi: É possível atingir um bom acabamento de superfície e menor desgaste de ferramenta, realizando um tratamento de esferoidização no aço SAE 4140?

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

Este estudo tem como objetivo geral avaliar qual é a influência do tratamento de esferoidização em relação ao desgaste da ferramenta e acabamento, no processo de usinagem por torneamento do aço SAE 4140.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar o desgaste da ferramenta através da medição por microscopia.
- Avaliar a integridade da superfície dos corpos de prova, com base na medição da rugosidade.
- Identificar os fatores responsáveis pelo aumento dos valores de desgaste e rugosidade obtidos nos ensaios.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

### 2.1 Desgaste e vida da ferramenta

A vida da ferramenta é o tempo em que a mesma trabalha efetivamente (deduzidos os tempos passivos), até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. Atingindo esse tempo, a ferramenta deve ser reafiada ou substituída.

Os fatores que determinam a fixação de um determinado valor-limite de desgaste para o fim da vida da ferramenta são vários. A ferramenta deve ser retirada de uso quando (DINIZ, 2013):

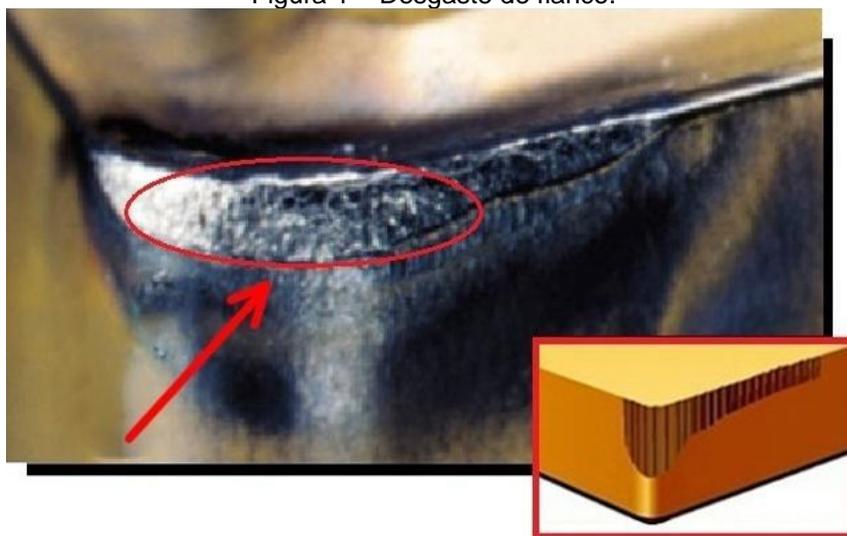
- a) Os desgastes atingirem proporções tão elevadas que se receia a quebra da aresta de corte. Isto é critério em operações de desbaste em que, por não ser necessária a obtenção de tolerâncias apertadas e bons acabamentos superficiais, permite-se que os desgastes cheguem a valores altos;
- b) Devido ao desgaste da superfície de folga da ferramenta, não é mais possível a obtenção de tolerâncias apertadas e/ou de bons acabamentos superficiais da peça. Isso é crítico em operações de acabamento;

Diversos são os tipos de desgaste e avarias que acontecem em ferramenta de usinagem. Antes de defini-los é importante diferenciá-los.

Desgaste é a perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta devido a ação do corte. As demais ocorrências são denominadas de avarias (DINIZ, 2013).

Desgaste frontal (ou de flanco): ocorre na superfície de folga da ferramenta causado pelo contato entre ferramenta e peça. É o mais comum dos tipos de desgaste.

Figura 1 – Desgaste de flanco.



Fonte: Londero (2014).

Desgaste de entalhe: em algumas ocasiões, também ocorre à formação deste desgaste nos dois extremos de contato entre a superfície de folga e a peça. Este tipo de desgaste, muda a forma do ponta da ferramenta e, com isso, influencia no acabamento da superfície usinada. É incentivado pelo aumento da temperatura e velocidade de corte (DINIZ, 2013).

Figura 2 – Desgaste de entalhe.



Fonte: Londero (2014).

Desgaste de cratera: é o que ocorre na superfície de saída da ferramenta, causada pelo atrito entre ferramenta e cavaco. Pode não ocorrer em alguns processos de usinagem, principalmente quando se utilizam ferramentas de metal duro recobertas (a cobertura de  $Al_2O_3$  é a mais eficiente contra a craterização), ferramentas de

cerâmicas e quando o material da peça é frágil (gera cavacos curtos). O crescimento do desgaste de cratera resulta na quebra da ferramenta, quando tal desgaste se encontra com o desgaste frontal (DINIZ, 2013).

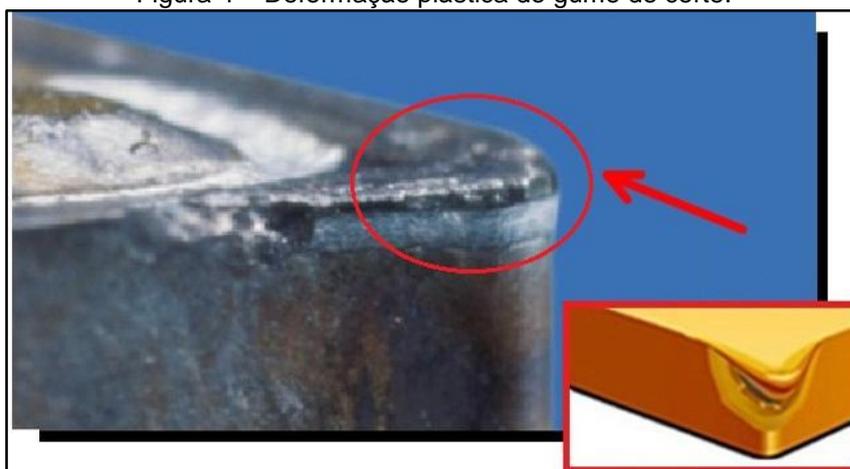
Figura 3 – Desgaste de cratera.



Fonte: Londero (2014).

Deformação plástica da aresta de corte: é um tipo de avaria da ferramenta. Muitas vezes a pressão aplicada à ponta de ferramenta, somada à alta temperatura, gera deformação plástica da aresta de corte, que toma uma forma bem típica (DINIZ, 2013).

Figura 4 – Deformação plástica do gume de corte.

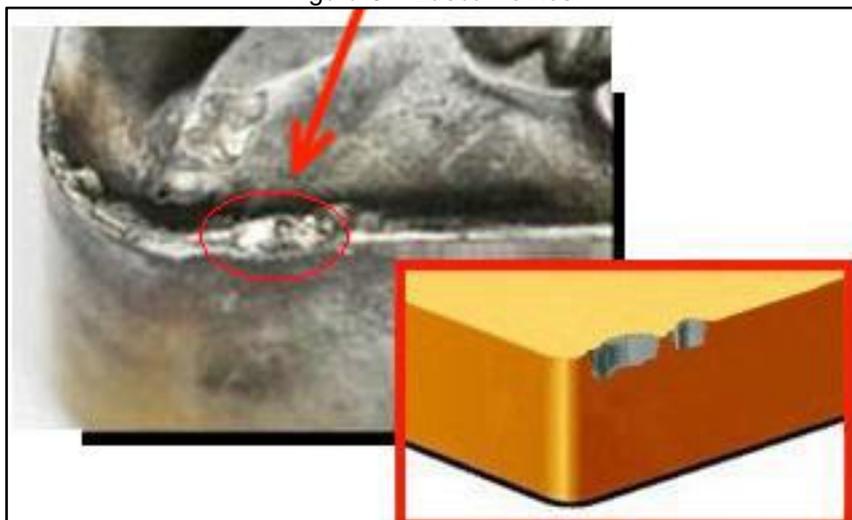


Fonte: Londero (2014).

Lascamento: é o tipo de avaria da ferramenta. Ao contrário do desgaste frontal e de cratera, que retiram continuamente partículas muito pequenas da ferramenta, no

lascamento partículas maiores são retiradas subitamente. Ocorre principalmente em ferramentas com material frágil e/ ou quando a aresta de corte é pouco reforçada (DINIZ, 2013).

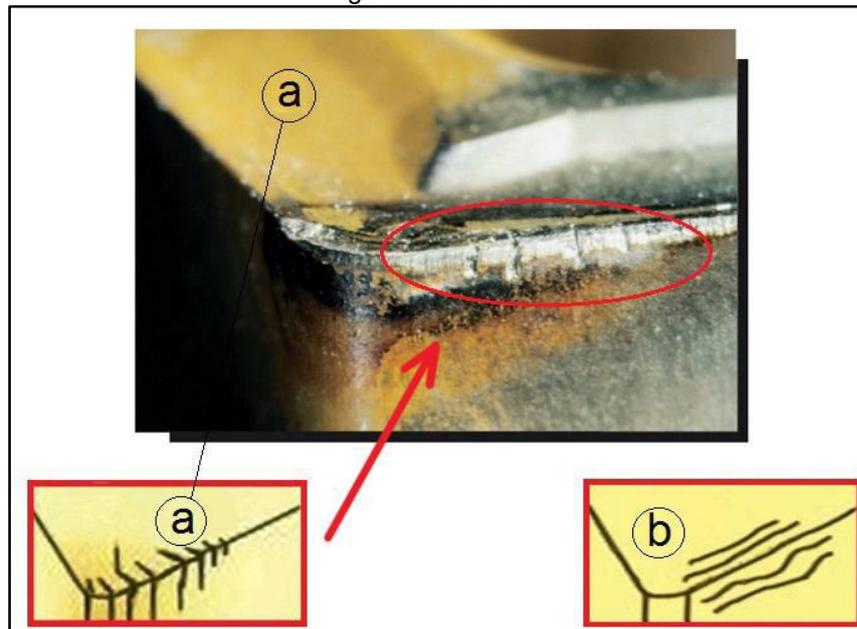
Figura 5 – Lascamentos.



Fonte: Londero (2014).

Trincas: são avarias provocadas pela variação e/ou dos esforços mecânicos. Quando as trincas têm origem térmica (variação da temperatura), ocorre perpendicularmente à aresta de corte, e quando têm origem mecânica são paralelas à aresta. Alguns fatores que geram variação de temperatura ou de esforços mecânicos na usinagem são: corte interrompido, acesso irregular do fluido de corte e variação da espessura de corte (típica do fresamento) (DINIZ, 2013).

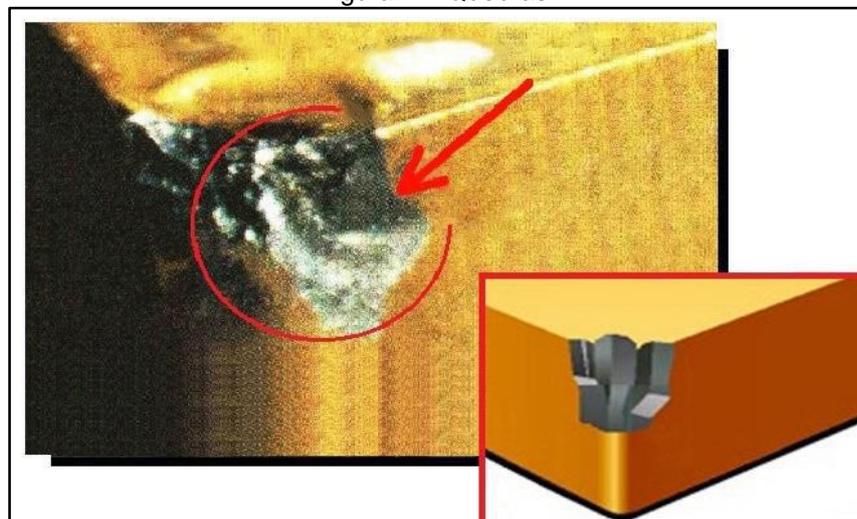
Figura 6 – Trincas.



Fonte: Londero (2014).

Quebra: Quando os desgastes e as avarias da ferramenta crescem, podem causar a quebra da aresta. Algumas vezes, porém, a quebra pode ocorrer inesperadamente devido a alguns fatores, como: ferramenta muito dura (em geral, quanto mais resistente ao desgaste é a ferramenta, menos tenaz e menos resistente ao choque ela é), carga excessiva sobre a ferramenta, raio de ponta, ângulo de ponta ou ângulo de cunha pequenos, corte interrompido, parada instantânea do movimento de corte, entupimento dos canais de expulsão de cavacos ou dos bolsões de armazenamento dos cavacos (DINIZ, 2013).

Figura 7 – Quebras.



Fonte: Londero (2014).

Segundo Porto (2004), durante a usinagem, a superfície é gerada por meio da remoção de materiais decorrentes de dois mecanismos: Deformação plástica e cisalhamento. Considerando um modelo ortogonal bidimensional, há dois locais na ferramenta onde pode ocorrer desgaste: na superfície de saída e na superfície de folga.

Durante o processo de usinagem, a ação de cortar muda a forma e, portanto, a geometria original da ferramenta de corte. Verifica-se um desgaste progressivo na superfície de folga de saída da ferramenta (SANTOS, 2007).

Para Stemmer (2006), esses desgastes que são muito comuns nas ferramentas de corte, são causados principalmente por alguns fenômenos. São eles:

- **Abrasão:** é considerada a principal causa de desgaste de uma ferramenta, tanto o desgaste de flanco quanto o desgaste de cratera. Ocorre devido ao arrancamento de partículas finas de material, decorrentes do escorregamento sob alta pressão e temperatura entre a peça e a ferramenta.
- **Aderência:** quando o material da peça entra em contato com a ferramenta sob baixas temperaturas e baixas velocidades de corte, criando entre elas um extrato metálico que provoca um atrito tão elevado que, na tentativa de separar as superfícies, ocorre a ruptura em um dos metais. Dessa forma as partículas rompidas de um metal migram para a superfície do outro causando a formação de outro tipo de desgaste chamado gume postiço. O gume postiço é mais comum na usinagem de materiais pastosos, como aços com baixo teor de carbono, aços inoxidáveis e alumínio. A baixa velocidade de corte aumenta a formação de gume postiço.
- **Difusão:** consiste na transferência de átomos de um metal para o outro ativado pela alta temperatura na zona de corte. Essa transferência tem a ver com a afinidade físico-química dos metais envolvidos na zona de cisalhamento do cavaco com a ferramenta. Diferentes tipos de revestimento de metal duro, por exemplo, podem favorecer a adesão como dificultar este mecanismo de desgaste.
- **Oxidação:** a principal causa de oxidação são as elevadas temperaturas em contato com o ar e a água contida nos fluidos de corte. Ele é formado

especialmente nas extremidades do cavaco com a ferramenta, tendo livre acesso do ar atmosférico, sendo este fator uma possível explicação para o desgaste de entalhe.

Tabela 1 – Principais tipos de desgastes, causas e ações para correção.

Tipo de desgaste e/ou avaria	Possíveis causa	Ações para minimizar
Desgaste de flanco	- Abrasão;	- Redução velocidade de corte;
	- Gume postiço;	- Classe ferramenta mais resistente;
	- Velocidade de corte muito alta;	- Aumento velocidade de corte se for por
	- Velocidade de corte muito baixa se for por gume postiço.	gume postiço.
Desgaste de entalhe	- Oxidação	- Fluido de corte com antioxidantes; - Redução velocidade de corte.
Desgaste de cratera	- Difusão	- Seleção classe ferramenta que possua óxido de alumínio.
Deformação plástica	- Altas temperaturas combinadas com altas pressões na região corte	- Redução velocidade de corte; - Classe ferramenta com maior dureza a quente.
Trinca de origem mecânica	- Variação excessiva de esforços na aresta de corte	- Classe ferramenta mais tenaz; - Redução do avanço; - Aumento Estabilidade.
Trincas de origem térmica	- Excessiva variação de temperatura	- Seleção classe ferramenta mais tenaz; - Aplicação de fluido de corte em abundância ou não aplicar.
Lascamento	- Classe da ferramenta muito frágil	- Seleção de classe de ferramenta mais tenaz
	- Geometria da ferramenta muito fraca	- Aumento ângulo de ponta raio de ponta e/ou do ângulo de cunha (chanframento de aresta).
	- Choques da ferramenta com a peça.	- Suavização do primeiro contato da ferramenta com peça.

Fonte: DINIZ (2013).

Na tabela 1 são apresentadas as principais causas dos tipos de desgaste e avarias que pode ocorrer nas ferramentas de corte.

### **2.1.1 Critério de vida da ferramenta**

A vida da ferramenta é o tempo em que a mesma trabalha efetivamente (deduzidos os tempos passivos), até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. Atingindo esse tempo, a ferramenta deve ser substituída (DINIZ, 2013).

Os fatores que determinam a fixação de um determinado valor-limite de desgaste para o fim da vida da ferramenta são vários. A ferramenta deve ser tirada de uso quando (DINIZ, 2013):

- a) Os desgastes atingirem proporções tão elevadas que se receia a quebra da aresta de corte. Isto é crítico em operações de desbaste em que, por não ser necessária a obtenção de tolerâncias apertadas e bons acabamentos superficiais, permite-se que os desgastes cheguem a valores altos;
- b) Devido ao desgaste da superfície de folga da ferramenta, não é mais possível a obtenção de tolerâncias apertadas e/ou de bons acabamentos superficiais da peça. Isso é crítico em operações de acabamento;
- c) Os desgastes crescem muito, fazendo com que a temperatura da aresta cortante ultrapasse a temperatura na qual a ferramenta perde o fio de corte (a aresta de corte se decompõe). Isso é crítico em ferramentas de aço-rápido, que suportam temperaturas menores que outros materiais para ferramenta;
- d) O aumento da força de usinagem, proveniente dos desgastes elevados da ferramenta, interfere no funcionamento da máquina.

Quando se utiliza ferramentas de metal duro com cobertura, o desgaste de flanco da ferramenta (nessas ferramentas o desgaste de cratera, em geral, é muito pequeno ou inexistente) cresce muito lentamente, decorrente da alta resistência ao desgaste das camadas de cobertura da ferramenta, até atingir os valores de  $V_b$  (desgaste de flanco) da ordem de 0,3 a 0,4mm.

Segundo DINIZ (2013) a norma ISO 3685 utiliza os parâmetros  $K_t$ ,  $VB_b$ ,  $VB_{b\text{máximo}}$  e  $VB_n$  para quantificar o desgaste nas ferramentas de corte. O critério recomendado para avaliar a de aço-rápido, metal duro e cerâmica é:

- a) Desgaste de flanco médio,  $VB_b = 0,3\text{mm}$ ;
- b) Desgaste de flanco máximo,  $VB_{b\text{máx}} = 0,6\text{mm}$ ;
- c) Profundidade de cratera,  $K_t = 0,06 + 0,3 f$ , onde  $f$  é avanço em mm/rev;
- d) Falha catastrófica.

Conforme SANTOS (2007), o fim de uma vida de uma ferramenta de corte é definido pelo grau de desgaste previamente estabelecido. O tamanho deste desgaste dependerá de inúmeros fatores. Entre outros, podem-se citar:

- Receio de quebra da cunha cortante;
- Elevadas temperatura na interface cavaco-ferramenta;
- As tolerâncias dimensionais estabelecidas no projeto já estão comprometidas;
- O acabamento a superfície usinada não é mais satisfatório;
- Aumento nas dimensões das rebarbas;
- Elevação da força de usinagem;
- Nível de ruído maior;
- Crescente nível de vibrações;
- Outros.

### **2.1.2 Como expressar a vida da ferramenta**

Fixado um critério para fim de vida como, por exemplo, o estabelecido na norma ISO 3685, ou em experiências acumuladas anteriormente, a vida da ferramenta pode ser expressa de diversas maneira (SANTOS, 2007):

- Números de peças produzidas;
- Percurso de avanço (mm)
- Percurso efetivo de corte (Km);
- Velocidade de corte para determinado tempo de vida (exemplo:  $V_c 60 = 150\text{m/min}$ );
- Volume do material removido;
- Outros.

## 2.2 Fluido de corte lubri-refrigeração

As principais funções dos fluidos de corte são refrigerar em altas velocidades e lubrificar em baixas velocidades de corte. Apresentam ainda outras ações classificadas como auxiliares (SANTOS, 2007).

Conforme DINIZ (2013), os requisitos que um fluido de corte deve possuir para retirar eficientemente o calor da região de corte, da peça e da ferramenta são:

- Baixa viscosidade a fim de que flua facilmente;
- Capacidade de “molhar” bem o metal para estabelecer um bom contato térmico;
- Alto calor específico e alta condutividade térmica.

Segundo Ferraresi (1970) a função do fluido de corte é introduzir uma melhoria no processo de usinagem dos metais. A melhoria poderá ser de caráter funcional ou de caráter econômico.

As melhorias de caráter funcional são aquelas que facilitam o processo de usinagem, conferindo a este um desempenho melhor. Entre estas melhorias distinguem-se:

- Redução do coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco;
- Expulsão do cavaco na região de corte;
- Refrigeração da ferramenta;
- Refrigeração da peça em usinagem;
- Melhor acabamento superficial da peça em usinagem;
- Refrigeração da máquina-ferramenta.

As melhorias de caráter econômico são aquelas que induzem a um processo de usinagem mais econômico. Entre estas melhorias distinguem-se:

- Redução do consumo de energia de corte;
- Redução do custo da ferramenta na operação;
- Impedimento da corrosão da peça em usinagem.

## 2.3 Aço SAE 4140

### 2.3.1 Características

O aço, basicamente, é uma liga ferro e carbono. Apresenta, entretanto uma variedade muito grande de composição; desde os aços de baixo carbono até os aços-ligas contendo alta concentração de um ou mais elementos, como, níquel, cromo, vanádio, tungstênio, molibdênio, etc. A identificação e especificação dessa grande variedade pode ser feita através de índices numéricos instituídos pela AISI e SAE norte-americanas, índices esses adotados pela ABNT, no Brasil.

O aço SAE 4140 é utilizado em aplicações que requeiram uma combinação de dureza moderada e uma boa resistência e tenacidade, mas em que as condições de serviço sejam moderadamente severas. O aço SAE 4140 está disponível como barra, vergalhão, peças forjadas, chapas, placas, tiras e peças fundidas. Ele é usado para muitas peças de máquinas de alta resistência (algumas delas nitretadas), tais como bielas, virabrequins, juntas de direção, eixos, peças de bombas, tubulação de alta pressão, grandes engrenagens industriais, flanges, peças de máquinas-ferramenta, chaves e pregos.

O aço SAE 4140 é um aço para beneficiamento com temperabilidade média, ligado ao cromo e molibdênio, utilizado na fabricação de diferentes componentes mecânicos onde se deseja uma boa combinação de resistência mecânica média e resistência à fratura. Também possui elevada resistência à fadiga.

A classificação do aço liga é feita a partir da norma SAE, que determina em quatro algarismos a composição química, propriedades mecânicas e principais aplicações do aço no mercado. Empresas especializadas em fornecer aço para fabricação de máquinas, equipamentos e peças dispõem de estoques do aço liga para suprir a demanda do mercado. A figura 8 abaixo demonstra um exemplo de um certificado de composição de material referente ao utilizado neste trabalho.

Figura 8 - Certificado de composição química do aço SAE 4140.

RADIÇÃO										
Comércio de Aços Especiais Ltda. - ME										
Rua Amazonas 434 Nova Brasília CEP 89252-274 – Jaraguá do Sul – SC										
CNPJ: 13.621.077/0001-20 – Insc. Est.: 256.400.776										
Fone: (47) 3054-0350 E-mail: radiaco@uol.com.br										
CERTIFICADO DE QUALIDADE										
Cliente:										
Nota fiscal:										
Material: SAE 4140										
Medidas: Ø 101,6 x 250 mm Quantidade: 02 peças										
Composição Química:										
C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Ca	
0,400	0,860	0,230	0,010	0,004	1,000	0,220	0,220	0,010	0,030	
Obs. Certificamos que os dados acima estão corretos e os documentos que lhes dão sustentação estão em nossos arquivos.										
 Djan Carlo da Silva										
Jaraguá do Sul, 09 de abril de 2019.										

Fonte: Radiação Distribuidora de Aço.

### 2.3.2 Principais aplicações do aço SAE 4140

Há diversas aplicações eficientes para o aço SAE 4140 na indústria. O aço é largamente utilizado para fabricar eixos, pinos, bielas, virabrequins e outros componentes na indústria agrícola, automobilística e mecânica em geral. Suas propriedades mecânicas ainda podem ser aprimoradas através do processo de nitretação, um tratamento termoquímico da metalurgia que proporciona o enriquecimento superficial com nitrogênio.

### 2.4 Usinabilidade do aço SAE 4140

Conforme Ferraresi (1970), a laminação a quente afeta a usinabilidade da seguinte maneira:

- Aços contendo até 0,30% de carbono: Há um abaixamento do índice de usinabilidade;

- Aços contendo de 0,30 a 0,40% de carbono: Há pouca influência;
- Aços contendo acima de 0,40% de carbono: Há um aumento do índice de usinabilidade

De um modo geral, usinabilidade pode ser definida como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo (índice de usinabilidade), um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão.

Pode-se ter um material que tenha uma boa usinabilidade quando se leva em conta uma propriedade de usinagem, por exemplo, a vida da ferramenta, e não possua boa usinabilidade quando toma outra propriedade, como a rugosidade da peça usinada (DINIZ, 2013).

O aço 4140 é uma liga metálica de boa resistência mecânica utilizada em várias aplicações da indústria. Trata-se de um aço de média usinabilidade, baixa soldabilidade e temperabilidade relativamente alta. Sua dureza superficial, quando temperada, varia de 54 a 59 Hrc.

O fator metalúrgico predominante na usinabilidade é, obviamente, a dureza. Geralmente, valores altos para a dureza significam dificuldades de usinagem, ao passo que valores médios e baixos se associam com boas propriedades de usinabilidade. A rigor, entretanto, as medidas de dureza não servem, de um modo absoluto, como guia para determinação de verdadeira usinabilidade do material, devido ao fato de que, antes do cavaco ser retirado ou separado inteiramente da peça, ocorre um certo encruamento do material sob a ação da ferramenta de corte. Além disso, dureza muito baixa pode, de certo modo, significar menores facilidades de usinagem. De fato, como a ação da usinagem consiste no arrancamento de partículas do metal, se este for muito dúctil, será muito plástico – como é o caso do constituinte ferrita em aço – e o material tende a aderir, em vez de ser arrancado, à ferramenta de corte (INFOMET, 2019).

## **2.5 Tratamento de esferoidização**

A esferoidização é um processo de ajuste morfológico que se dá sob a ação da energia superficial, onde ocorre uma evolução macroestrutural da perlita pelo mecanismo de coalescimento, com conseqüente formação de carbonetos globulares em uma matriz ferrítica. Partículas de cementita lamelar, presentes na perlita, têm uma

área de superfície por unidade de volume de partícula muito grande, e, portanto, uma elevada energia interfacial. Afim de reduzir esta energia, as lamelas de cementita ou placas se quebram em pequenas partículas que eventualmente assumem forma esférica. Uma vez quebrada as lamelas, as menores partículas esféricas se dissolvem às custas do crescimento das maiores, novamente em função da redução da energia interfacial (FAGUNDES, 2006).

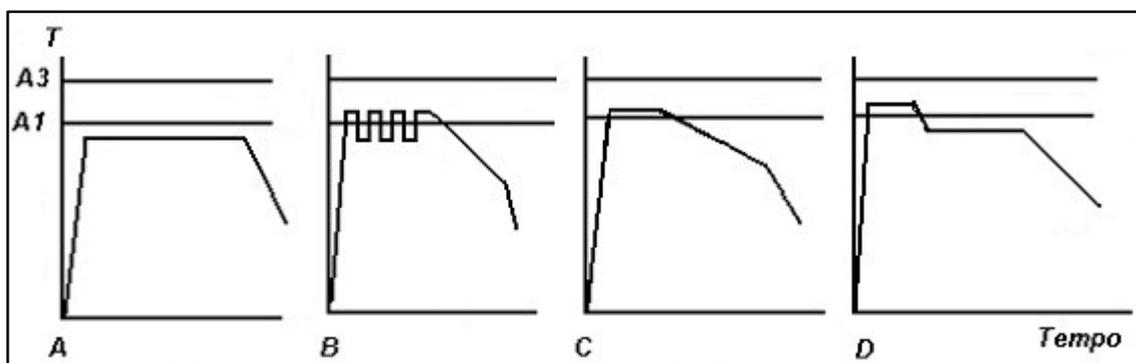
Pode-se demonstrar que a taxa de esferoidização está diretamente relacionada com a difusão do carbono na ferrita e que a mesma decresce com o crescimento do tamanho médio da partícula. Elementos de liga diminuem a taxa de difusão de carbono na ferrita (coeficiente de difusão) e, portanto, a taxa do processo de esferoidização. Se o aço contiver elementos formadores de carbonetos, ocorre o mesmo efeito, reduzindo fortemente a taxa de esferoidização (FAGUNDES, 2006).

No recozimento de esferoidização se objetiva alterar a distribuição dos carbonetos na microestrutura especialmente aqueles presentes na perlita, transformando-os em pequenos glóbulos ou esferas, dispersos na matriz. Este tratamento não é, normalmente, acompanhado por transformação de fases. A força motriz para a transformação da microestrutura é a redução de área interfacial. A esfera é a forma geométrica de menor relação área/volume.

Em diversos casos, especialmente aços de médio a alto carbono, está microestrutura é muito favorável para usinabilidade (COLPAERT, 2008).

De um modo geral, para o processo de esferoidização dos aços podem ser utilizados os ciclos térmicos apresentados na figura 9.

Figura 9: Ciclos térmicos utilizados para o processo de recozimento de esferoidização.



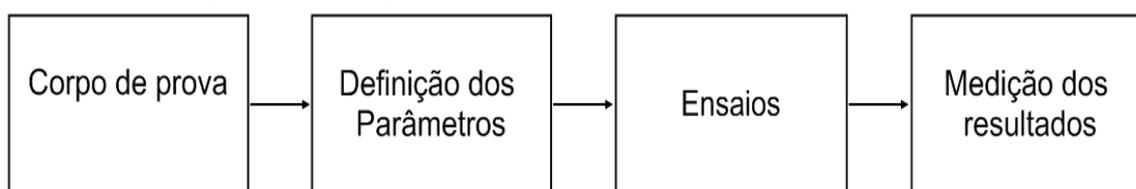
Fonte: Fagundes (2006).

Em virtude do ciclo térmico e da microestrutura prévia influenciarem a cinética de esferoidização, vários processos têm sido desenvolvidos para acelerar este recozimento, de maneira a reduzir o tempo de tratamento. Como exemplo pode-se citar as técnicas alternativas utilizadas atualmente em siderúrgicas, onde obtêm-se estruturas de mais fácil esferoidização direto da linha de laminação, através de resfriamento controlado.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para facilitar o entendimento da metodologia utilizada, foi desenvolvido um fluxograma especificando as etapas a serem seguidas (Figura 10).

Figura 10: Fluxograma para as estampas de materiais e métodos.



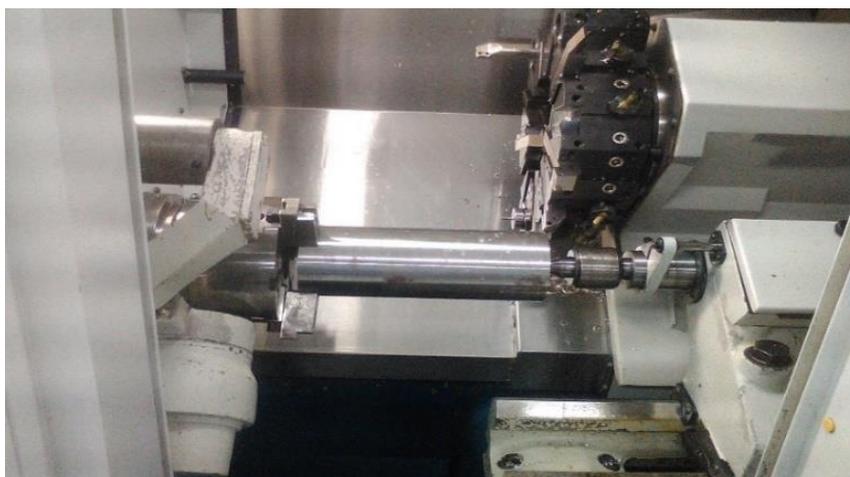
Fonte: Autor (2019).

#### 3.1 Corpo de Prova

O material selecionado para desenvolvimento do trabalho de conclusão, foram duas barras cilíndrica de 101,6 mm de diâmetro por 250 mm de comprimento, do aço SAE 4140.

Na preparação dos corpos de prova, foi desbastado em sua superfície aproximadamente 2,6mm de material, para eliminar a superfície proveniente do processo de laminação a quente. Ficando com suas dimensões efetiva de Ø99 mm x 250 mm de comprimento (figura 11).

Figura 11: Barra cilíndrica de aço SAE 4140.



Fonte: Autor (2019).

Um dos corpos de prova foi submetido a um tratamento de esferoidização, por uma empresa especializada, situada na cidade de Guaramirim, SC. Conforme figura 12, a empresa emitiu um certificado do tratamento de esferoidização. Foi retirado a dureza do material antes do tratamento térmico, e a dureza encontrada foi de 212 HB, e após o tratamento, a dureza ficou em 156 HB.

Figura 12: Certificado de tratamento de esferoidização.

Página: 1 Hora: 10:19:07 Data: 16/04/19

**CERTIFICADO DE TRATAMENTO TÉRMICO**  
EMPRESA CERTIFICADA ISO 9001

Nro. 669762

Cliente: 6523	CLEBER ALVES DA SILVA
Nota do Cliente: 290034	Pedido do Cliente: 164629
Material: 4140	Peça: EIXO AMOSTRA PARA TCC
Quantidade: 1.0000	Peso: 8.5000

Especificações  
Inspeção Inicial  
Tratamento: **COALESCIMENTO DE ESFEROIDIZAÇÃO**

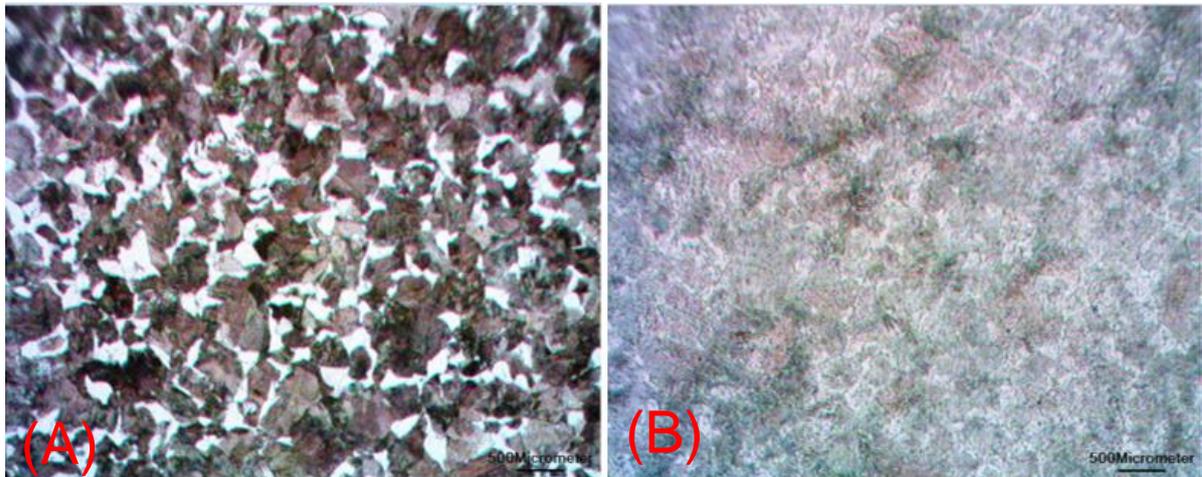
Propriedades Solicitadas	Propriedades Obtidas	Nr. Peças Testadas	Observações
Camada (mm):	Camada (mm):	1,0000	DUREZA INICIAL 212HB
Dureza: QUE DER	Dureza: 156HB		

<b>Durômetro:</b> Cód.: 11 DUROMETRO WOLPERT HT1a Empresa Certificadora: DUROCONTROL Nº Certificado Calibração: CAL-2474.1018.00 Data de Calib.: 19/10/18 Próxima Calib.: 19/10/19	<b>Controle:</b> Controlador: EDNALDO JESUS NETO Data: 12/04/19 Hora: 13:58
---	---

Fonte: Autor (2019).

Foi realizado uma análise de micrografia (figura13), nos dois corpos de prova, para confiabilidade do tratamento, aonde podemos notar na figura (A) carbonetos esferoidizados em uma matriz ferrítica. Material esferoidizado, com os grãos brancos de ferrita e os escuro de cementita. Na figura (B) corresponde a microestrutura do material sem esferoidização, aonde pode-se notar uma estrutura mais homogênea.

Figura 13: Figura (A) micrografia do aço SAE 4140 com esferoidização, e a (B) sem esferoidização.



Fonte: Autor (2019).

### 3.2 Definição dos parâmetros

Para o ensaio de usinagem, foi utilizado um torno CNC da marca ROMI GL240 (Figura 14). O fluido lubri-refrigeração utilizado foi semi-sintético marca Master solúvel em água, com diluição de 10 para 1, indicado para usinagens severas em metais ferrosos e não ferrosos, sendo aplicado na parte externa do inserto com uma vazão de 90 L/hora, com objetivo de minimizar o calor gerado sobre a ferramenta.

Figura 14: Torno ROMI GL240.



Fonte: Autor (2019).

Como ferramenta de corte, selecionou-se um inserto TNMG 160404R – ZC de classe P10-P30, com raio de ponta 0,4mm conforme a figura 15.

Figura 15: Inserto utilizado para ensaio de usinabilidade.



Fonte: Autor (2019).

Na realização da usinagem dos corpos de provas foram estabelecidos os seguintes parâmetro conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Descrição dos parâmetros de corte utilizados.

<b>Parâmetros de usinagem</b>	
Velocidade de corte (m/min.)	260
Avanço (mm/rev.)	0,3
$a_p$ (mm)	1
Comprimento útil usinado (mm)	215
Fluido lubri-refrigeração (L/h)	90

Fonte: Autor (2019).

### 3.3 Ensaios

Os corpos de provas com e sem esferoidização, foram usinados conforme os parâmetros da Tabela 2, com tempo total de 19 minutos. A cada 1 minuto de T.C, é retirado os valores de rugosidade (Tabela 3).

Para avaliar o desgaste, foram estabelecidos os tempos de corte de 5 e 16 minutos, conforme demonstrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Tabela para coleta de dados no ensaio.

<b>Aço SAE 4140 com esferoidização</b>		<b>Aço SAE 4140 sem esferoidização</b>		
<i>Tempo de corte min.</i>	<i>Rugosidade (Média)</i>	<i>Tempo de corte min.</i>	<i>Rugosidade (Média)</i>	<i>Avaliação do desgaste</i>
1	Medido	1	Medido	
2	Medido	2	Medido	
3	Medido	3	Medido	
4	Medido	4	Medido	
5	Medido	5	Medido	<b>Desgaste avaliado</b>
6	Medido	6	Medido	
7	Medido	7	Medido	
8	Medido	8	Medido	
9	Medido	9	Medido	
10	Medido	10	Medido	
11	Medido	11	Medido	
12	Medido	12	Medido	
13	Medido	13	Medido	
14	Medido	14	Medido	
15	Medido	15	Medido	
16	Medido	16	Medido	<b>Desgaste avaliado</b>
17	Medido	17	Medido	
18	Medido	18	Medido	
19	Medido	19	Medido	

Fonte: Autor (2019).

### 3.4 Medição dos resultados

Para obtenção dos valores de rugosidade obtidos nos ensaios, foi utilizado um rugosímetro digital portátil, modelo TR220 (Figura 16). As medições foram realizadas na superfície usinada, em três pontos da peça cilíndrica, com parâmetro de trabalho em Ra. Esse parâmetro consiste em avaliar a média de rugosidade encontrada em um cut-of de 0,8mm.

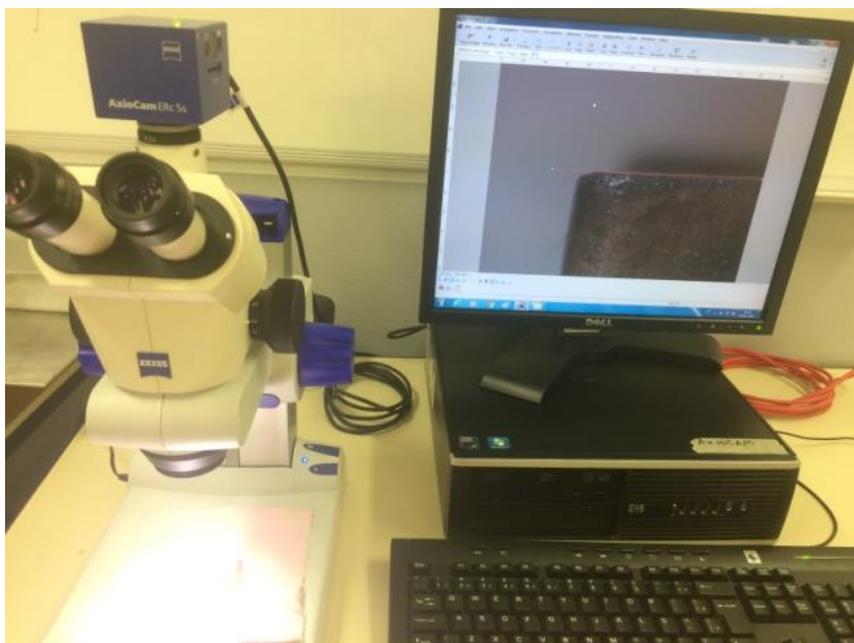
Figura 16: Rugosímetro digital portátil, modelo TR220.



Fonte: Autor (2019).

Na análise do desgaste de Flanco e Ponta, ocorrido no inserto durante os ensaios, foi utilizado o Estereoscópio Modelo 2000-C (Figura 17) disponível no laboratório de ensaios do Instituto Federal de Santa Catarina – Jaraguá do Sul, Campus Geraldo Werninghaus.

Figura 17: Análise dos desgastes no estereoscópio.



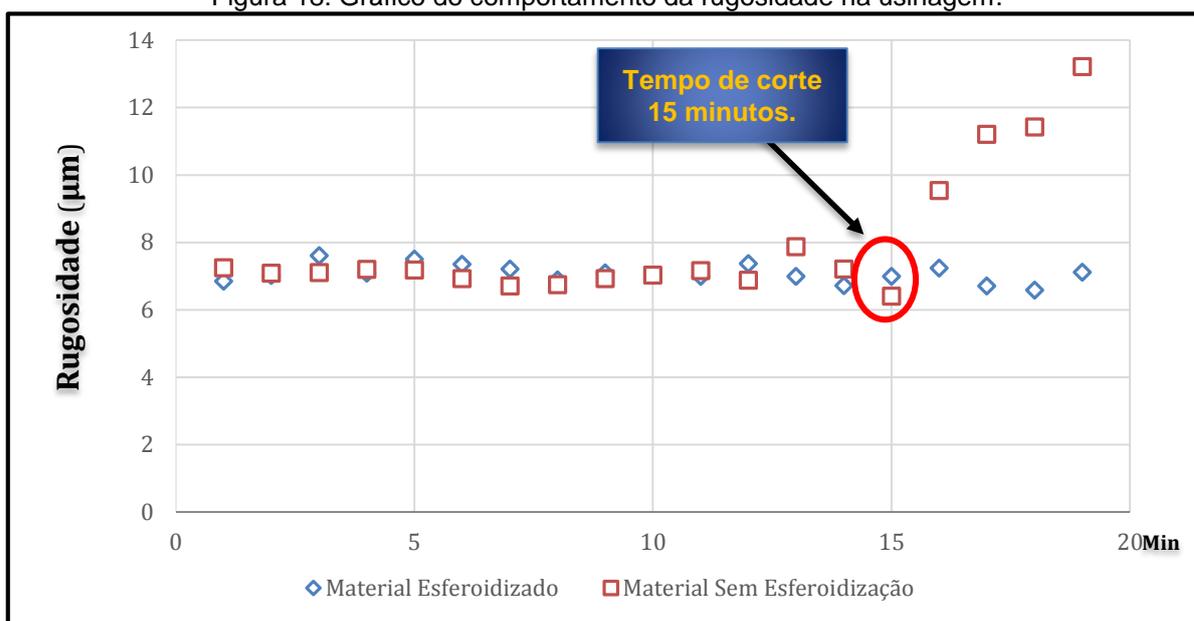
Fonte: Autor (2019).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Rugosidade

Os dados obtidos de rugosidade nos ensaios, foram distribuídos na Figura 18 e Tabela 4.

Figura 18: Gráfico do comportamento da rugosidade na usinagem.



Fonte: Autor (2019).

Na análise dos dados da rugosidade, percebeu-se que os materiais ensaiados com e sem esferoidização, teve um comportamento parecido até um certo tempo de corte. Apartir de 15 minutos a rugosidade do material sem tratamento subiu consideravelmente, enquanto o material esferoidizado manteve a rugosidade, sem crescimento até o final do ensaio.

Tabela 4 - Rugosidades.

<b>Aço SAE 4140 com esferoidização</b>		<b>Aço SAE 4140 sem esferoidização</b>	
Tempo de corte min.	Resultado rugosidade (Média)	Tempo de corte min.	Resultado rugosidade (Média)
1	6,85	1	7,25
2	7,02	2	7,09
3	7,61	3	7,11
4	7,09	4	7,2
5	7,5	5	7,18
6	7,35	6	6,93
7	7,21	7	6,71
8	6,89	8	6,75
9	7,1	9	6,93
10	7,03	10	7,03
11	6,99	11	7,16
12	7,37	12	6,88
13	6,99	13	7,87
14	6,72	14	7,21
15	6,99	15	6,41
16	7,24	16	9,54
17	6,71	17	11,21
18	6,59	18	11,43
19	7,12	19	13,22

Fonte: Autor (2019).

De acordo com os ensaios, os valores referentes a rugosidade ficaram próximos até o tempo de corte de 15 minutos. Após este tempo já com 16 minutos, o material sem esferoidização aumentou sua rugosidade para 9,54 $\mu$ m consequentemente 11,21 $\mu$ m, 11,43 $\mu$ m e com 19 minutos quando o ensaio foi encerrado, a rugosidade encontrada foi de 13,22  $\mu$ m, enquanto o material esferoidizado, manteve sua rugosidade em 7,24 $\mu$ m, 6,71 $\mu$ m, 6,59 $\mu$ m, e no tempo de corte de 19 minutos foi encontrado 7,12 $\mu$ m.

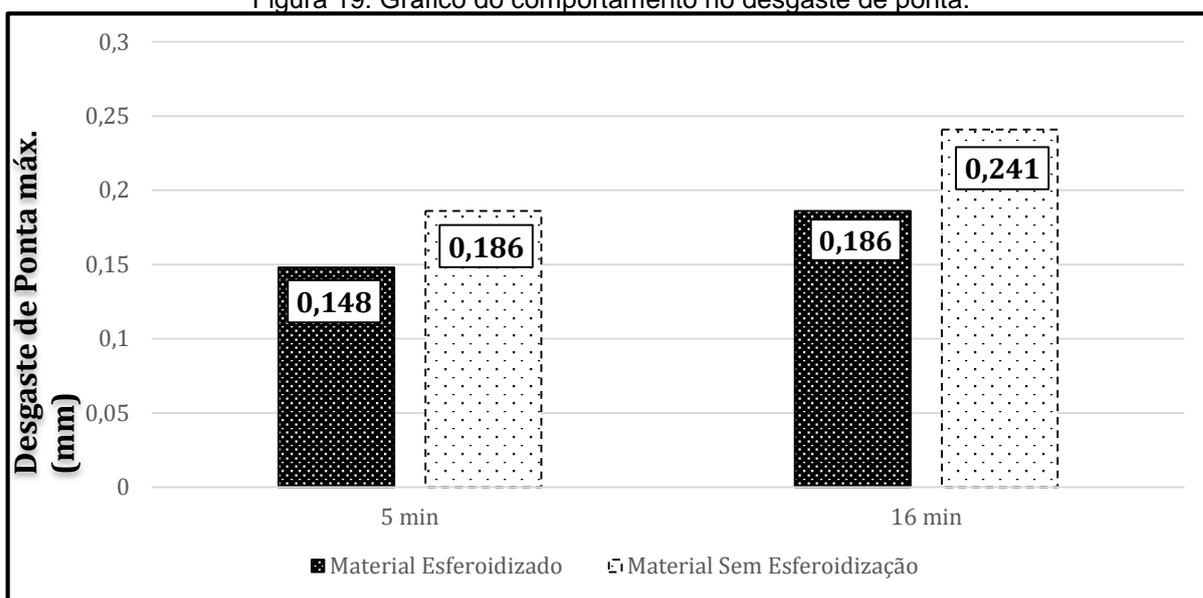
Assim se for levado em conta o critério de fim de vida como a rugosidade, é possível afirmar que a ferramenta na usinagem do material esferoidizado, tem a vida no mínimo 25% maior de Tempo corte do que o sem esferoidização.

## 4.2 Desgaste da ferramenta

### 4.2.1 Desgaste de ponta

As análises feitas em laboratório nos insertos, para estratificar o desgaste de ponta, podem ser exemplificadas nas Figuras 19 e 20.

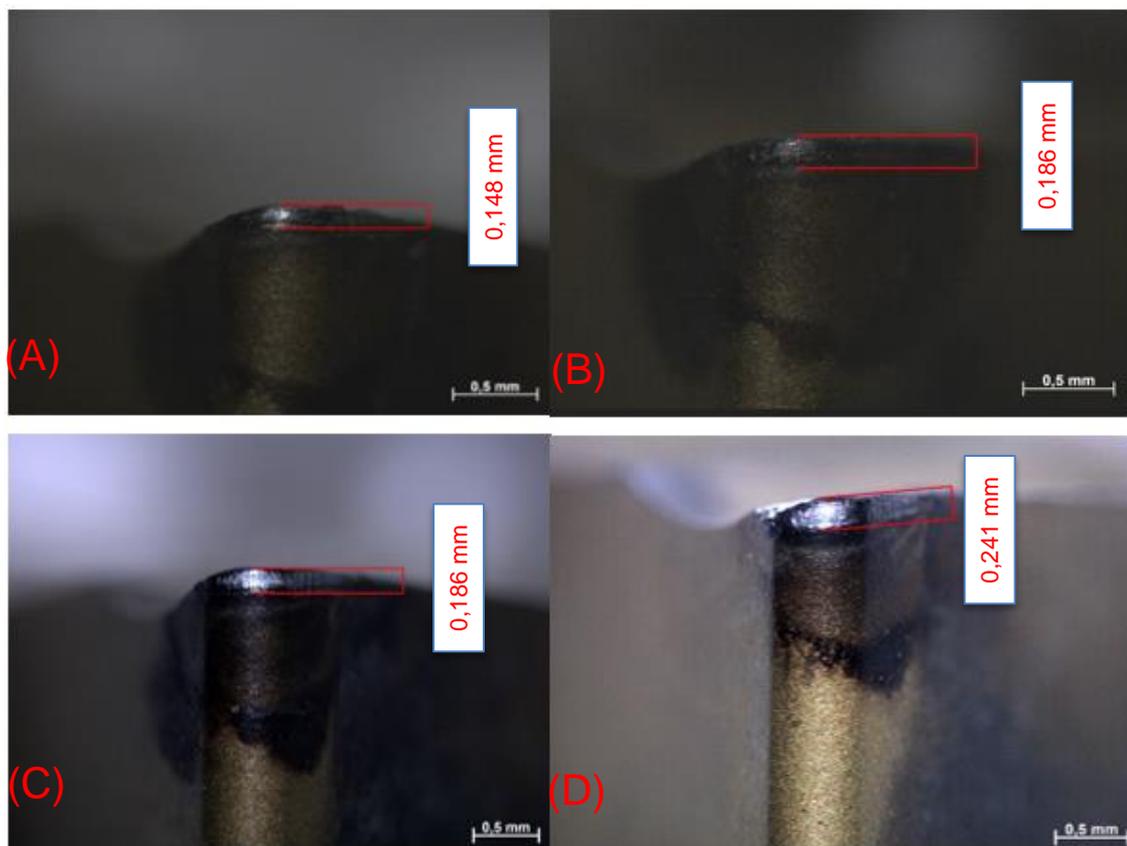
Figura 19: Gráfico do comportamento no desgaste de ponta.



Fonte: Autor (2019).

Conforme análise feita, quando comparado ao desgaste de ponta, pode-se notar que, o material esferoidizado teve menor desgaste na avaliação de 5 e 16 minutos. Nota-se que o que o desgaste para 16 minutos do material esferoidizado foi de 0,186 $\mu$ m, o mesmo resultado apresentado no material sem esferoidização no ensaio de 5 minutos.

Figura 20: Desgaste de ponta. Figura (A) com esferoidização e (B) sem esferoidização para análise de 5 minutos T.C Figura (C) com esferoidização e (D) sem esferoidização para análise 16 minutos.

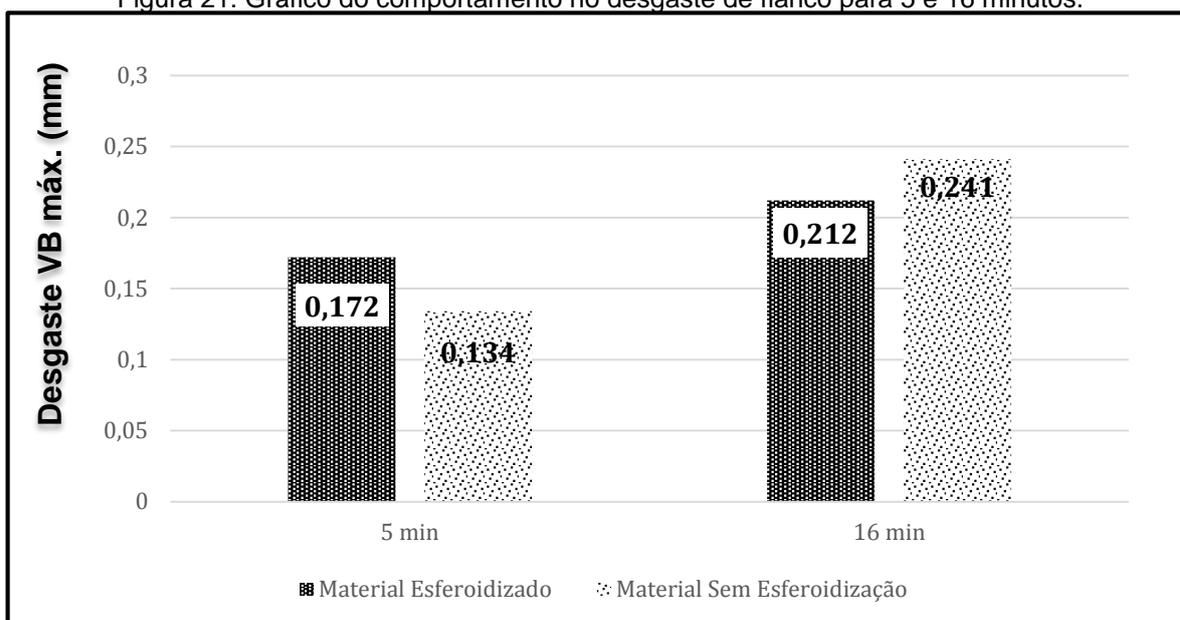


Fonte: Autor (2019).

#### 4.2.2 Desgaste de flanco

Os resultados das análises de desgaste de flanco, podem ser demonstradas através da Figura 21 e 22.

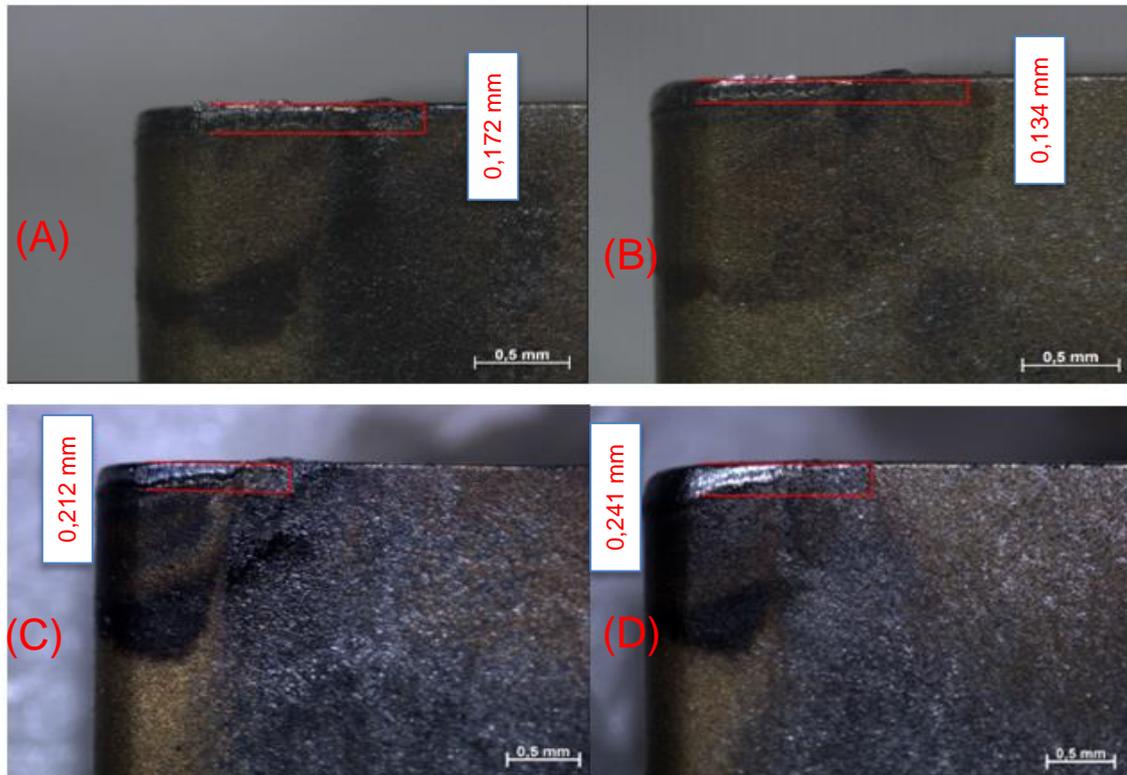
Figura 21: Gráfico do comportamento no desgaste de flanco para 5 e 16 minutos.



Fonte: Autor (2019).

Na avaliação dos desgastes, o material esferoidizado proporciona menor desgaste na usinabilidade dos inserto. Apesar que na avaliação de cinco minutos para desgaste de flanco, o inserto que usinou o corpo de prova esferoidizado, foi maior, mas a avaliação final, prevaleceu o maior desgaste para a condição sem esferoidização.

Figura 22: Desgaste de ponta. Figura (A) com esferoidização e (B) sem esferoidização para análise feita de 5 minutos. Figura (C) com esferoidização e (D) sem esferoidização para análise feita de 16 minutos.



Fonte: Autor (2019).

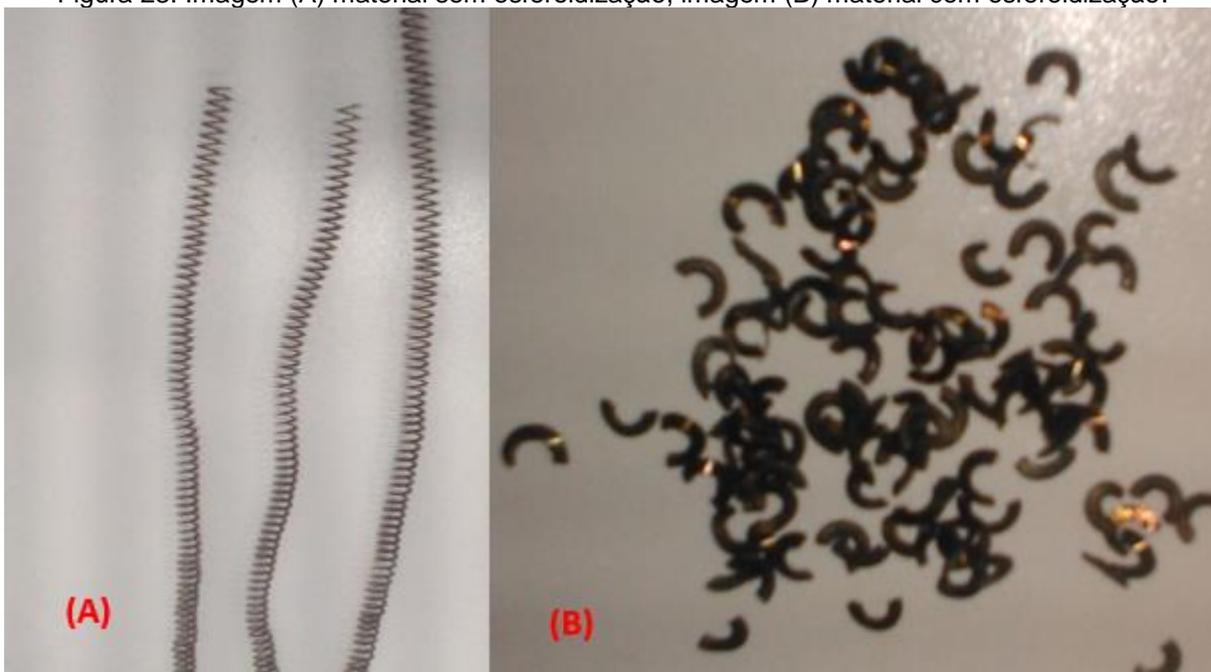
Quando analisado o comportamento da ferramenta ao desgaste de flanco, pode-se notar que, no tempo de corte para 5 minutos, o material esferoidizado apresentou um desgaste de  $0,172\mu\text{m}$ , enquanto o sem esferoidização apresentou  $0,134\mu\text{m}$ . Já na avaliação das ferramentas com 16 minutos, como esperado, a ferramenta que usinou o corpo de prova esferoidizado teve seu desgaste menor, em relação ao sem esferoidização.

Para explicar o desgaste superior do material esferoidizado com 5 minutos, como hipótese é possível afirmar:

- Diferença da ferramenta; A ferramenta pode ter qualidade diferente em relação a outra;
- Aresta postiça de corte: Uma possível causa, que pode ter minimizado o desgaste de flanco na ferramenta que usinou o material sem esferoidização, pode ter ocorrido um (APC) aresta postiça de corte, no início da usinagem, reduzindo o contato da ferramenta com o material, e minimizando o desgaste de flanco

- Formato do cavaco: O cavaco apresentado no método esferoidizado, foi de formato de espiras curtas, enquanto no método sem esferoidização, teve formação de espiras longas, conforme Figura 23. Essa formação promove plano de cisalhamento com maior frequência, isto pode ser o motivo do desgaste ser mais acentuado no início do processo.

Figura 23: Imagem (A) material sem esferoidização, imagem (B) material com esferoidização.



Fonte: Autor (2019).

## 5 CONCLUSÃO

Através do estudo realizado com dados obtidos em ensaios práticos, pode-se concluir que o tratamento de esferoidização pode influenciar na redução dos desgastes e na rugosidade da superfície usinada do aço SAE 4140.

- A usinagem realizada no material esferoidizado, promoveu menor desgaste na ferramenta quando comparado com o material sem esferoidização.

- Na avaliação da rugosidade, foi constatado que o aço SAE 4140 esferoidizado, teve acabamento superior ao aço SAE 4140 sem esferoidização. Dentre os fatores observados que podem influenciar na usinabilidade do aço SAE 4140, pode-se citar que a diferença da ferramenta, formato do cavaco e aresta postiça de corte, podem contribuir na alteração dos desgastes da ferramenta.

## REFERÊNCIAS

- COLPAERT, H. (2000) **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4ªed. Edgard Blücher LTDA, 2008.
- DINIZ, Anselmo Eduardo et al. **Tecnologia da usinagem do Materiais**. 8ªed. São Paulo, SP: Editora Artliber Editora Ltda, 2013.
- FAGUNDES, Edson José Fagundes. **“Análise da Influência do Ciclo de Recozimento de Esferoidização nas Propriedades Mecânicas do Aço SAE 1050”**. 206. Disponível em: <<https://ppgem.eng.ufmg.br/defesas/1025M.PDF>>. Acesso em: 11 abr. 2019.
- FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Materiais**. 14ªed. São Paulo, SP: Editora Edgard Blucher Ltda, 2011.
- GGD metais. (2019) Distribuidor de Aços e Metais da América Latina. São Paulo – SP. Disponível em: <https://ggdmetals.com.br/produto/sae-4140/>. Acesso em: 30 junho 2019.
- INFOMET (1998) Tratamento térmicos dos Aços. Copacabana – RJ. Disponível em: <https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=21>. Acesso em: 16 abril 2019.
- LONDERO, Felipe Oliveira Londero. **Avaliação de desgastes em ferramentas de metal duro, revestido no torneamento do aço SAE 5160 esferoidizado**. 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/1937/TCC%20Felipe%20Oliveira%20Londero.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 13 abr. 2019.
- PORTO, Arthur José Vieira. **Usinagem de ultraprecisão**. 1ªed. São Carlos, SP: Editora Rima, 2004.
- PKM aços. (2019) Aços 4140. Guarulhos – SP. Disponível em: <<http://www.pkmacos.com.br/aco-4140>>. Acesso em: 10 maio 2019.
- SANTOS, Sandro Cardoso. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo, SP: Editora Artliber Editora Ltda, 2007.
- SOCHIO, Jader André Dal Sochio. **Influência do tratamento de esferoidização sobre as propriedades mecânicas do aço AISI 5140**. 2014. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/103825/000936621.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- STEMMER C. R. **Ferramentas de Corte I**. 6º. Ed. Florianópolis: Editora Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. 249p.