

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

ALEXANDRE VENTURI

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL
AUSTENÍTICO ABNT 304 L

Jaraguá do Sul

2017

ALEXANDRE VENTURI

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL
AUSTENÍTICO ABNT 304 L

Monografia apresentada ao Curso de Tecnologia em Fabricação Mecânica, do Câmpus Jaraguá do Sul – Rau, do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Gil Magno Portal Chagas.

Jaraguá do Sul/SC

2017

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

Venturi, Alexandre

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL
AUSTENÍTICO ABNT 304 L / Alexandre Venturi ; orientação
de Gil Magno Portal Chagas. Jaraguá do Sul, SC,
2017.**

54 p.

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

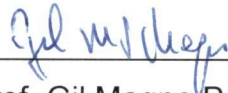
**1. Aço inoxidável. 2. Torneamento. 3. Usinagem.
4. ABNT 304 L. I. Magno Portal Chagas, Gil. II. Instituto
Federal de Santa Catarina. . III. Título.**

ALEXANDRE VENTURI

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL
AUSTENÍTICO ABNT 304 L

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de 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, 12 de dezembro de 2017.

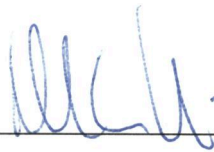


Prof. Gil Magno Portal Chagas,

Dr. em Engenharia Mecânica

Orientador

Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. Delcio Luis Demarchi,

Me. em Engenharia Mecânica

Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. Vanderlei Junkes, Me.

Engenharia Mecânica e de Materiais

Instituto Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a minha família e a
todas pessoas que de alguma forma
estiveram comigo nessa jornada.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde.

A minha família e amigos, pela compreensão e pelo incentivo.

Ao professor orientador Gil Magno Portal Chagas, pela confiança e por compartilhar seus conhecimentos.

A todos professores que me auxiliaram neste trabalho, bem como a todos aqueles que compartilharam suas experiências ao longo do curso.

A todos os técnicos dos laboratórios utilizados para os experimentos práticos e a toda equipe de apoio do IFSC Câmpus Jaraguá do Sul - Rau.

Muito obrigado!

RESUMO

Os aços inoxidáveis são muito utilizados por apresentarem uma excelente resistência à corrosão. De todos os aços inoxidáveis os mais utilizados são os austeníticos, entretanto quando há a necessidade de usiná-los algumas dificuldades podem surgir durante o processo. A quebra dos cavacos é muito difícil, assim como obter um bom acabamento superficial principalmente no processo de torneamento, pois este tipo de material é muito dúctil. Para avaliar o processo de torneamento do aço inoxidável austenítico foi elaborado um estudo com o do tipo ABNT 304 L. As avaliações realizadas compreendem a análise da rugosidade superficial da peça, a forma dos cavacos e o desgaste da ferramenta em diferentes condições de corte. Foi utilizada uma ferramenta de corte com cobertura de TiALN+TiN. Nos ensaios realizados o avanço não interferiu de maneira significativa no desgaste da ferramenta, em contrapartida, quanto maior o avanço, maior a rugosidade superficial obtida. A rugosidade real da usinagem ficou próxima da teórica calculada. Com maiores avanços foi possível obter cavacos em forma de arco. Com alteração da velocidade de corte não foi possível notar mudanças significativas na rugosidade, porém os desgastes de flanco reduziram. A ferramenta utilizada teve um bom desempenho nos ensaios por não apresentar grandes desgastes.

Palavras-chave: Aço inoxidável. Torneamento. Usinagem. ABNT 304 L.

ABSTRACT

Stainless steels are widely used because they have excellent corrosion resistance. Of all the stainless steels the most used are the austenitic ones, however when there is the necessity of machining them some difficulties can appear during the process. The breaking of the chips is very difficult, as well as obtaining a good surface finish mainly in the turning process, because this type of material is very ductile. In order to evaluate the turning process of austenitic stainless steel, a study was carried out with the ABNT 304L type. The evaluations included the analysis of the surface roughness of the piece, the shape of the chips and the wear of the tool under different cutting conditions. A cutting tool with TiALN + TiN coverage was used. In the tests, the feed did not significantly interfere with the wear of the tool. On the other hand, the higher the feed rate, the greater the surface roughness obtained. The actual roughness of the machining was close to the calculated theoretical. With greater feeds it was possible to obtain arch-shaped chips. With change of the cutting speed it was not possible to notice significant changes in the roughness, but the flank wear reduced. The tool used had a good performance in the tests because it did not show great wear.

Keywords: Stainless steel. Turning. Machining. ABNT 304 L.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Exemplos de corte ortogonal	16
Figura 2 - Processo de formação de cavaco	17
Figura 3 - Zonas de cisalhamento primárias e secundárias	18
Figura 4 - Formas de cavacos produzidos na usinagem dos metais.....	19
Figura 5 - Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos.....	20
Figura 6 - Ferramentas de metal duro.....	21
Figura 7 - Classificação dos metais duros segundo a norma ISO 513:2004E	22
Figura 8 - parâmetros de desgaste utilizados pela norma ISO 3685.....	24
Figura 9 - Desgaste de flanco	25
Figura 10 - Desgaste de cratera.....	26
Figura 11 - Desgaste de entalhe	26
Figura 12 - Deformação plástica	27
Figura 13 - Lascamento/ Quebra.....	27
Figura 14 – Trincas de origem térmica.....	28
Figura 15 - Mecanismos de desgaste das ferramentas de corte em função da temperatura.....	28
Figura 16 - Parâmetro de rugosidade Ra	30
Figura 17 - Durômetro	38
Figura 18 - Nanocamadas da ferramenta classe IC807	39
Figura 19 - ferramenta TNMG 160408	39
Figura 20 - Torno CNC ROMI.....	40
Figura 21 - Microscópio óptico	41
Figura 22 - Estereoscópio	41
Figura 23 - Usinagem do corpo de prova.	42
Figura 24 - Posições das medições da rugosidade.....	43
Figura 25 - Medição da rugosidade.....	43
Figura 26 - Relação entre velocidade de corte e avanço com a rugosidade.....	45
Figura 27 - Desgaste de flanco com a velocidade de corte.....	46
Figura 28 - comparação entre o maior e o menor desgaste da ferramenta.	47
Figura 29 - Relação entre o avanço e o desgaste de flanco	48
Figura 30 - Amostra dos cavacos.....	49
Figura 31- Cavacos segmentados.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química do aço inoxidável austenítico 304L	37
Tabela 2- Parâmetros de corte.....	42
Tabela 3 - Posições das medições da rugosidade.....	44
Tabela 4 - ANOVA – 95% de Confiança.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ap – Profundidade de corte

f – Avanço

$VB_{\text{máx}}$ – Desgaste de Flanco Máximo

vc – Velocidade de Corte

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivos específicos.....	14
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1	Processos de usinagem.....	15
2.2	Torneamento	15
2.3	A formação do cavaco	15
2.3.1	O Corte Ortogonal	16
2.3.2	Classificação dos cavacos.....	18
2.4	Ferramentas de corte – metal duro	20
2.4.1	Metal duro com cobertura.....	22
2.4.2	Desgaste e vida útil de uma ferramenta de corte	23
2.4.2.1	Desgaste de flanco	25
2.4.2.2	Desgaste de cratera	25
2.4.2.3	Desgaste de entalhe.....	26
2.4.2.4	Deformação plástica da aresta de corte	26
2.4.2.5	Lascamento / Quebra:	27
2.4.2.6	Trincas.....	27
2.4.3	Mecanismos de desgaste: Adesão, abrasão, difusão e oxidação.	28
2.5	Rugosidade	29
2.5.1	Definição dos parâmetros de rugosidade	29
2.5.2	Rugosidade no torneamento	30
2.6	Aços inoxidáveis	31
2.6.1	Aços inoxidáveis martensíticos.....	31
2.6.2	Aços inoxidáveis ferríticos	32
2.6.3	Aços inoxidáveis austeníticos.....	32
2.7	Usinabilidade dos aços austeníticos ABNT 304	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	Materiais	37
3.2	Ferramenta de corte	38
3.3	Equipamento utilizado no ensaio de usinagem.....	40

3.4	Equipamentos para análise	40
3.5	Métodos	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	Análise das rugosidades	44
4.2	Análise de desgaste da ferramenta.....	46
4.3	Análise dos cavacos	48
5	CONCLUSÃO.....	51
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	52
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

A competitividade nas empresas do setor metal mecânico é muito acirrada e, para manter estas empresas competitivas no mercado é necessário uma gestão eficiente dos processos com a utilização de indicadores confiáveis (COPPINI, 2015).

Nos dias atuais o Brasil está perdendo emprego e renda pelo fato de que empresas multinacionais preferem produzir em países como a China e a Índia, por conseguirem ambientes mais favoráveis e custos mais baixos de produção. Para mudar esse cenário uma das grandes necessidades é a eficiência na produção e com o menor custo possível e, para a indústria metalmeccânica, isso depende bastante de técnicos e engenheiros, que devem pesquisar e aprender cada vez mais sobre os processos de fabricação e qual a melhor maneira para gerenciá-los (COPPINI, 2015).

Nos processos de usinagem é importante que as peças sejam produzidas de forma correta e com boa qualidade. Antes de iniciar a fabricação deve-se avaliar qual a melhor ferramenta a ser usada para esta operação, garantindo-lhe, assim, sua vida útil, bem como uma boa produtividade no processo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Alguns processos de usinagem, como o torneamento de aços inoxidáveis austeníticos, possuem grandes dificuldades de usinagem. Essas dificuldades acontecem devido às características do material, como a baixa condutividade térmica e o elevado encruamento, fazendo com que o desgaste da ferramenta venha a aumentar. Durante a usinagem dos aços inoxidáveis a formação dos cavacos também é um grande problema, pois geralmente são longos e empastam na superfície de saída da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Uma das maiores dificuldades para o torneamento de materiais dúcteis, como o aço inoxidável austenítico, é a definição de uma ferramenta com parâmetros de usinagem adequados e que proporcionem uma boa produtividade. Dessa forma, é importante estudar e verificar os efeitos dos parâmetros de corte e da ferramenta no torneamento desses aços.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o desgaste da ferramenta, o acabamento da peça e a formação do cavaco em diferentes parâmetros de corte no torneamento do aço ABNT 304 L.

1.1.2 Objetivos específicos

- Comparar o desgaste em diferentes condições de corte na usinagem do aço ABNT 304 L;
- Verificar o comportamento do acabamento superficial do aço inoxidável ABNT 304 L no processo de torneamento;
- Verificar o efeito dos parâmetros de corte utilizados nas formas dos cavacos gerados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Processos de usinagem

Os processos de usinagem podem ser entendidos como aqueles que dão forma à peça a partir da remoção do material excedente na forma de cavaco. A usinagem pode ser considerada um processo de alto custo ao produto final, pois deve garantir as tolerâncias da peça, bem como o seu acabamento final (FERRARESI, 1970; COPPINI, 2015).

2.2 Torneamento

No processo de torneamento a peça é rotacionada pelo eixo árvore da máquina e a ferramenta se movimenta simultaneamente, removendo cavacos (FERRARESI, 1970).

O torneamento pode ser classificado como de desbaste ou de acabamento. A operação de usinagem de desbaste é a que antecede a de acabamento, deixando um sobremetal na peça. No desbaste deve-se ter o maior aproveitamento em termos de produtividade das máquinas e ferramentas. O torneamento de acabamento tem a finalidade de melhorar a precisão da peça que está sendo usinada, deixando-a com as dimensões finais. As condições para a usinagem de acabamento são bem menos severas que as de desbaste, em contrapartida são utilizadas maiores velocidades de corte (FERRARESI, 1970).

Diferentes operações de torneamento podem ser realizadas em um torno, como torneamento cilíndrico externo, interno, cônico externo, cônico interno, faceamento, perfilhamento, sangramento e recartilhamento (MACHADO et al., 2011).

2.3 A formação do cavaco

“A formação do cavaco influencia diversos fatores ligados à usinagem, tais como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado na usinagem, a penetração do fluido de corte, etc” (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013, p.39). Por esse motivo, diversos autores, como Shaw (2005), Trent (2000) e Santos e Sales (2007) têm estudado o processo de formação do cavaco visando promover a

melhoria do processo.

2.3.1 O Corte Ortogonal

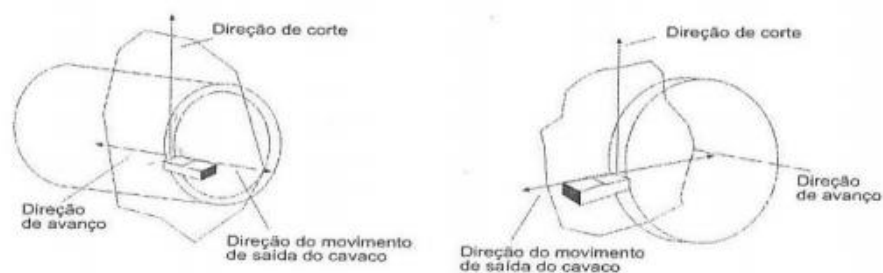
Uma forma de avaliar o processo de formação do cavaco é utilizar o corte ortogonal. Este tipo de corte é uma simplificação do corte tridimensional cujas direções dos movimentos de corte, de avanço e de saída do cavaco fazem parte de um mesmo plano (SANTOS; SALES, 2007).

Conforme Machado et al. (2011) e Santos e Sales (2007), para que o corte seja ortogonal devem ser atendidas algumas outras simplificações, tais como:

- a) Não pode haver aresta postiça de corte e os cavacos devem ser contínuos;
- b) A aresta de corte deve ser reta e perpendicular ao plano de trabalho;
- c) O cavaco não pode ter uma largura diferente da espessura do corte;
- d) A espessura de corte h é a mesma que o avanço e deve ser pequena em relação à largura do corte b , como pode ser visto na Figura 1;
- e) A largura da aresta de corte deve ser maior que a largura de corte b .

A Figura 1 mostra exemplos de cortes ortogonais onde é possível observar que as direções de corte, de avanço e de saída de cavacos podem ser consideradas um fenômeno bidimensional.

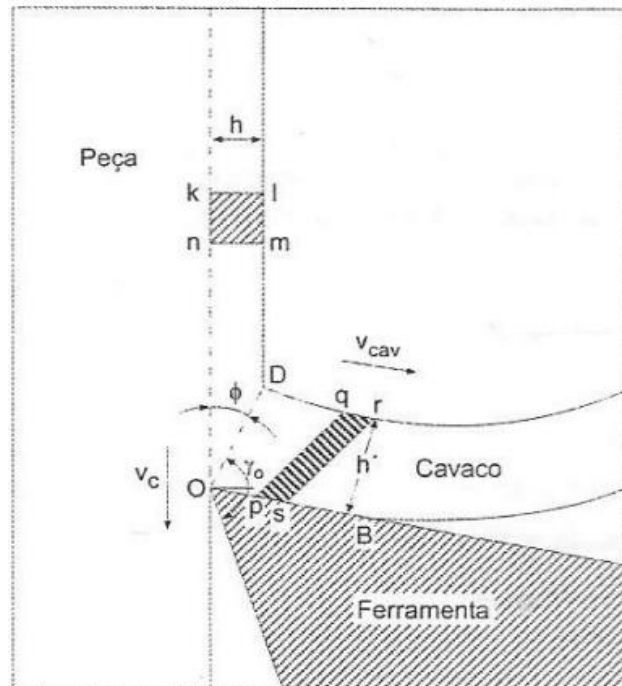
Figura 1- Exemplos de corte ortogonal



Fonte: SANTOS; SALES (2007, p. 44).

A Figura 2 mostra o processo de formação do cavaco ortogonal. De acordo com o modelo, o material da seção “KLMN” se desloca com velocidade “ v_c ” em direção à cunha de corte da ferramenta. Ao atingir a região de cisalhamento primário representada pelo plano “O-D”, o material sofre deformações elásticas e plásticas intensas, se rompe no ponto “O” e forma o cavaco com seção “PQRS” (SANTOS; SALES, 2007).

Figura 2 - Processo de formação de cavaco



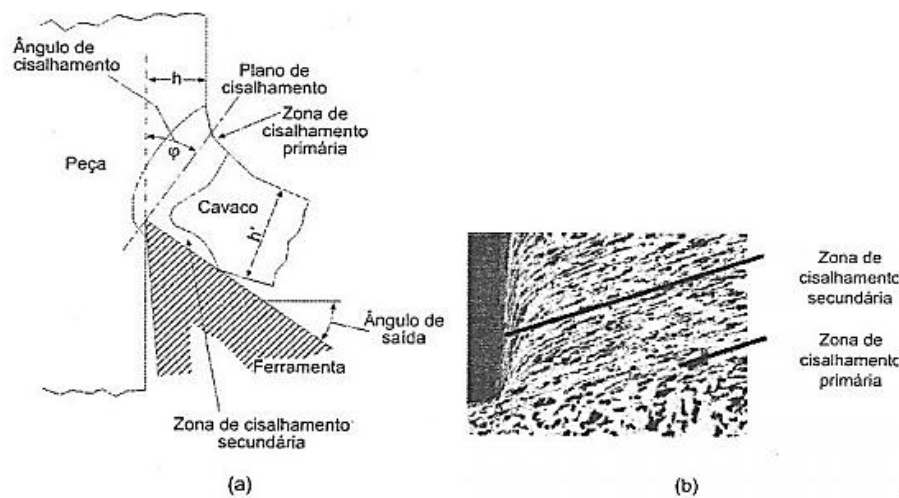
Fonte: SANTOS, SALES (2007, p.46).

Segundo Machado et al. (2011), Diniz, Marcondes e Coppini (2013) e Santos e Sales (2007), as etapas para a formação do cavaco podem ser resumidas em:

- a) Deformação elástica ou recalque inicial;
- b) Deformação plástica;
- c) Ruptura;
- d) Movimento do cavaco sobre a superfície da ferramenta.

A Figura 3 (a) mostra a região de formação do cavaco, com as zonas de cisalhamento primária e secundária. A figura 3 (b) mostra um exemplo de cavaco com material deformado nessas zonas.

Figura 3 - Zonas de cisalhamento primárias e secundárias



Fonte: SANTOS; SALES (2007, p.47).

2.3.2 Classificação dos cavacos

A geometria do cavaco pode ser crítica no processo de usinagem. Cavacos longos na forma de fitas podem oferecer riscos ao operador e danos à peça e à máquina ferramenta. Por este motivo é importante identificar e definir formas de controlar o cavaco gerado.

Segundo Machado et al. (2011) e Santos e Sales (2007), os cavacos são subdivididos em três tipos:

- a) Cavacos contínuos: é o mais comum na usinagem de materiais mais dúcteis, pois com esses materiais se tem um equilíbrio entre a tensão normal e a de cisalhamento na formação do cavaco, dificultando a quebra e favorecendo a formação de aresta postiça de corte na ferramenta.
- b) Cavacos descontínuos: São os tipos gerados na usinagem de materiais mais frágeis, pois não conseguem suportar deformações grandes sem quebrar;
- c) Cavacos segmentados: são caracterizados por grandes deformações continuadas em estreitas bandas entre segmentos com pouca ou quase nenhuma deformação nos seus interiores. Esse tipo de cavaco acontece durante a usinagem de materiais com baixa condutividade térmica, como ligas de titânio e aço inoxidável austenítico, pois o calor gerado durante a formação do cavaco provoca redução da resistência ao cisalhamento,

fazendo com que continue se deformando e dando origem a um novo segmento. O ciclo deste tipo de cavaco vai se repetindo.

Conforme Machado et al. (2011), os cavacos também são classificados segundo a forma como fita, helicoidal, espiral, lascas ou pedaços. A Figura 4 mostra essa classificação de acordo com a norma ISO 3685.

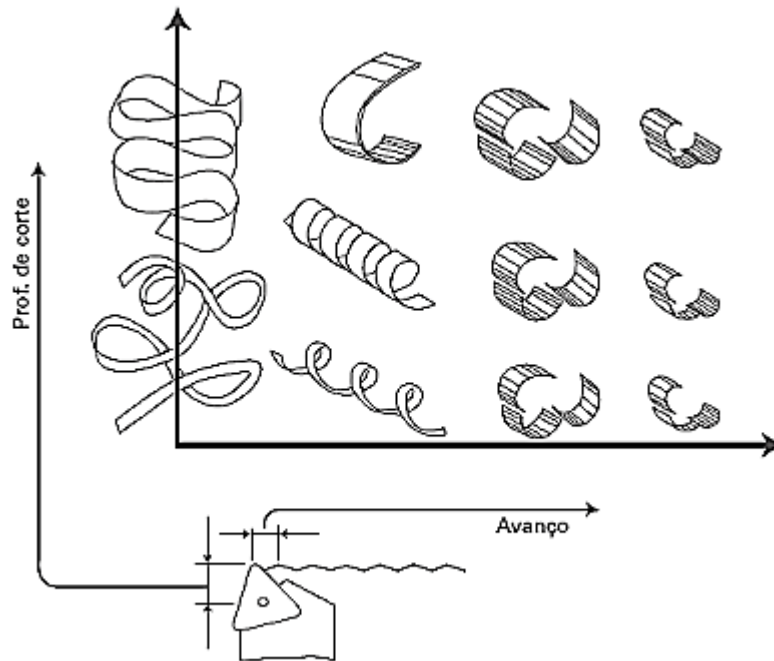
Figura 4 - Formas de cavacos produzidos na usinagem dos metais

1- Cavaco em fita	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco hel. tipo arruela	5- Cavaco hel. cônico	6- Cavaco em arco	7- Cavaco fragmentado	8- Cavaco tipo agulha
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plana	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conect.		
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
1-3- Emaranhado	2-3- Emaranhado		4-3- Emaranhado	5-3- Emaranhado			

Fonte: MACHADO et al. (2011, p.72).

O material da peça é o que mais influencia nas formas e nos tipos de cavaco. Materiais dúcteis tendem a formar cavacos longos, indesejáveis, por outro lado, materiais frágeis tendem a formar cavacos curtos e fragmentados (MACHADO et al., 2011). Assim, é importante adotar formas de promover o controle e a quebra dos cavacos. Um método de controle de cavaco é selecionar parâmetros de corte, como avanço e profundidade, que evitem a formação de cavacos longos. Outro método muito tradicional é selecionar ferramentas que utilizam uma geometria para quebrar o cavaco. Na Figura 5 tem-se o efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos. Como pode ser verificado, quanto maior o avanço, maior a probabilidade de quebra do cavaco.

Figura 5 - Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos



Fonte: MACHADO et al. (2011, p.73).

2.4 Ferramentas de corte – metal duro

Com o avanço tecnológico e a concorrência atual o uso de ferramentas de corte com coberturas mais eficazes gera ganho na produtividade. O metal duro é o material mais utilizado para as ferramentas de usinagem por apresentar dureza — quando submetido a altas temperaturas e à temperatura ambiente —, resistência ao desgaste e tenacidade (MACHADO et al., 2011).

As ferramentas de metal duro utilizadas na usinagem possuem diferentes geometrias e revestimentos, como pode ser observado na Figura 6. Conforme Diniz, Marcondes e Coppini (2013), para a seleção correta da ferramenta devem ser levados em consideração alguns fatores muito importantes, a saber:

- a) Material a ser usinado: A dureza do material e o tipo de cavaco que este material gera durante o processo de usinagem;
- b) Condição da máquina operatriz: Se a máquina possui folgas ou limitações quanto às forças geradas ao processo de usinagem;
- c) Forma e dimensões da ferramenta: A ferramenta deve ter a forma e as dimensões compatíveis com o processo de usinagem que será utilizado e o material a ser usinado;

- d) Condições de usinagem: Se a ferramenta será utilizada numa operação de acabamento ou desbaste;
- e) Custo do material da ferramenta: Dependendo da quantidade a ser produzida e do revestimento ideal o custo-benefício não é viável;
- f) Condições da operação: Essa condição depende muito da rigidez da máquina ou se o corte do material for do tipo contínuo ou interrompido.

Figura 6 - Ferramentas de metal duro



Fonte: Shimatools (2017).

As ferramentas de metal duro possuem uma ampla variedade de aplicações. A ferramenta a ser utilizada deve ser definida de acordo com a geometria, o tipo de quebra de cavacos e a classe do material, que influenciam diretamente a resistência mecânica e a resistência ao desgaste. Segundo Machado et al. (2011), a norma ISO 513 (2004) classifica o metal duro em seis grupos diferentes, cada um com subgrupos, conforme apresentados na Figura 7. Quanto maior o número da classe e subgrupo, maior a tenacidade e menor a resistência ao desgaste.

Figura 7 - Classificação dos metais duros segundo a norma ISO 513:2004E

Principais classes			Classes de aplicação			
Letra de identificação	Cor de identificação	Materiais a serem usinados	Metais duros		a	b
P	Azul	Aços: Todos os tipos de aços e aços fundidos, exceto aços inoxidáveis com estrutura austenítica	P01 P10 P20 P30 P40 P50	P05 P15 P25 P35 P45	↑	↓
M	Amarelo	Aço Inoxidável: aço inoxidável austenítico e aço duplex (austenítico/ferrítico) e aço fundido	M01 M10 M20 M30 M40	M05 M15 M25 M35	↑	↓
K	Vermelho	Ferro fundido: Ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafita esferoidal, ferro fundido maleável	K01 K10 K20 K30 K40	K05 K15 K25 K35	↑	↓
N	Verde	Metais não ferrosos: Alumínio e outros metais não ferrosos, materiais não metálicos	N01 N10 N20 N30	N05 N15 N25	↑	↓
S	Marrom	Superligas e titânio: Ligas especiais resistentes ao calor à base de ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio	S01 S10 S20 S30	S05 S15 S25	↑	↓
H	Cinza	Materiais duros: Aços endurecidos, ferros fundidos endurecidos, ferros fundidos resfriados	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25	↑	↓
a – Aumento da velocidade de corte, aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta. b – Aumento do avanço, aumento da tenacidade do material da ferramenta.						

Fonte: MACHADO et al. (2011, p. 214).

Os subgrupos que estão em cada classe dependem da composição química do material da ferramenta e o tamanho dos grãos de carboneto (MACHADO et al., 2011). Como pode ser visto na Figura 7, a classe M é a mais indicada para os aços inoxidáveis.

2.4.1 Metal duro com cobertura

Dos metais duros utilizados nas ferramentas de corte de usinagem, entre 80% e 90% possuem algum revestimento, que são aplicados utilizando o processo de deposição química a vapor (CVD), gerado por reações químicas a temperaturas de 700-1050°C, ou por deposição física a vapor (PVD), gerado em temperaturas de

400-600°C (SANDVIK, 2017).

Algumas pastilhas de metal duro podem ter até três diferentes tipos de revestimento, sendo o carboneto de titânio (TiC), o óxido de alumínio (Al_2O_3), o nitreto de titânio (TiN) e o carbonitreto de titânio (TiCN) os mais utilizados (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). As características de cada um desses revestimentos são apresentadas a seguir.

- a) TiCN: Possui resistência ao desgaste por abrasão, agregando resistência ao desgaste de flanco (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013);
- b) Al_2O_3 : Resistente à craterização, garante estabilidade térmica em altas temperaturas, melhorando a resistência à deformação plástica (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013), (SANDVIK 2017);
- c) TiN: Reduz o atrito entre a ferramenta e o cavaco, melhorando a resistência ao desgaste (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; SANDVIK, 2017).
- d) TiC: Resistente ao desgaste por abrasão (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Conforme Diniz, Marcondes e Coppini (2013) e Sandvik (2017), outro revestimento utilizado nas ferramentas de metal duro, principalmente para a usinagem de aço inoxidável, é o Nitreto de Titânio Alumínio (TiALN), por apresentar as seguintes características:

- a) Maior resistência à oxidação: Permite a usinagem em altas temperaturas. Quando o TiALN oxida, ele forma uma camada de Al_2O_3 tornando-se resistente à difusão e à oxidação;
- b) Baixa condutividade térmica: Facilita a remoção do calor através do cavaco e protege a aresta de corte;
- c) Alta dureza a frio e a quente;
- d) Alta estabilidade química, reduzindo o desgaste de cratera;
- e) Baixo coeficiente de atrito.

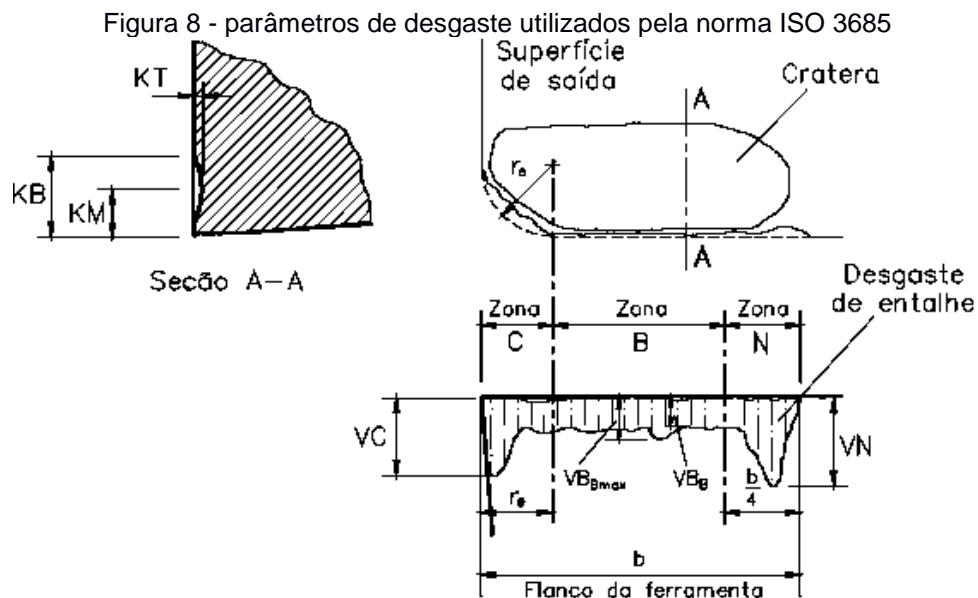
2.4.2 Desgaste e vida útil de uma ferramenta de corte

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), Ferraresi (1970) e Coppini (2015), a vida útil de uma ferramenta de corte pode ser definida como o tempo que a mesma está efetivamente usinando o material.

Alguns fatores devem ser avaliados para definir a troca de uma ferramenta, tais como:

- Quando o acabamento superficial não está mais atingindo a rugosidade esperada;
- Em operações de desbaste, quando o desgaste da aresta cortante for muito grande, o que pode provocar a sua quebra;
- Nas operações de acabamento, quando o desgaste da ferramenta dificulta a estabilidade de tolerâncias muito pequenas;
- Quando o desgaste aumenta o atrito entre a ferramenta e o material também aumentam, fazendo com que com a temperatura da aresta cortante atinja valores superiores ao normal (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; FERRARESI, 1970).

A Figura 8 mostra os parâmetros utilizados pela norma ISO 3685 para quantificar os desgastes nas ferramentas de corte.



Fonte: MACHADO et al. (2011, p. 268).

Na usinagem de desbaste da maioria dos materiais a ferramenta deve ser substituída quando o valor de desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$) atingir 0,6 mm, de modo que não aconteça a sua quebra. Nas operações de acabamento o desgaste deve ser de 0,2 a 0,3 mm, para não comprometer as tolerâncias dimensionais. O principal fator causador do desgaste da ferramenta de corte é a velocidade de corte. Depois, pode acontecer pelo avanço e, por último, pela

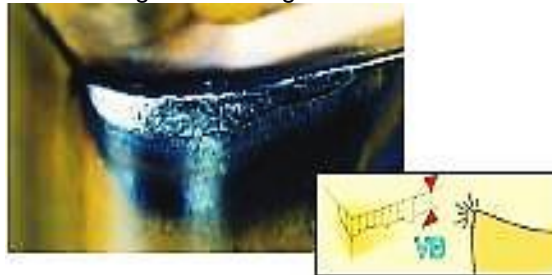
profundidade do corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; (MACHADO et al., 2011).

Na sequência, estão descritos os principais tipos de desgaste que ocorrem nas ferramentas de corte.

2.4.2.1 Desgaste de flanco

Este é o tipo mais comum de desgaste que ocorre nas ferramentas de corte durante o processo de torneamento. Esse tipo de desgaste também é chamado de desgaste frontal e ocorre pelo atrito da ferramenta com o material, provocando alterações na rugosidade superficial da peça juntamente com sua tolerância dimensional (SANDVIK, 2017). Pode acontecer tanto por utilizar velocidades de corte muito altas quanto muito baixas. Para minimizar este tipo de desgaste, o ideal é utilizar uma classe de ferramenta mais resistente ao desgaste e aumentar a velocidade de corte, se o desgaste é causado pela aresta postiça de corte (APC), (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). A Figura 9 mostra um exemplo de ferramenta com desgaste de flanco.

Figura 9 - Desgaste de flanco



Fonte: SANDVIK 2017

2.4.2.2 Desgaste de cratera

O desgaste de cratera acontece na superfície da saída da ferramenta e ocorre pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Quando este desgaste aumenta pode acontecer a quebra da aresta da ferramenta de corte (SANDVIK, 2017). A classe de ferramenta mais indicada para este caso é a que possui revestimento de óxido de alumínio (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). A Figura 10 apresenta uma ferramenta com desgaste de cratera.

Figura 10 - Desgaste de cratera



Fonte: SANDVIK (2017).

2.4.2.3 Desgaste de entalhe

O desgaste de entalhe altera a geometria da ponta da ferramenta influenciando no acabamento superficial da peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013) e é muito comum na usinagem de aços inoxidáveis (SANDVIK, 2017). A Figura 11 mostra uma ferramenta com um detalhe do desgaste tipo entalhe.

Figura 11 - Desgaste de entalhe



Fonte: SANDVIK 2017.

2.4.2.4 Deformação plástica da aresta de corte

Acontece pela pressão aplicada na ponta da ferramenta em conjunto com a alta temperatura durante a usinagem, dificultando o controle do cavaco e do acabamento superficial. Quando ocorre este desgaste indica-se reduzir a velocidade de corte e utilizar uma ferramenta com maior dureza a quente (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). A Figura 12 apresenta um exemplo de ferramenta com deformação plástica de aresta de corte.

Figura 12 - Deformação plástica



Fonte: SANDVIK (2017).

2.4.2.5 Lascamento / Quebra:

É o tipo de desgaste que retira grandes partículas da aresta cortante da ferramenta e geralmente acontece com ferramentas mais frágeis ou quando a aresta de corte é pouco reforçada, provocando a quebra da ferramenta. Utilizar uma ferramenta de classe mais tenaz reduz este desgaste (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). A Figura 13 apresenta um exemplo de lascamento da ferramenta de corte.

Figura 13 - Lascamento/ Quebra

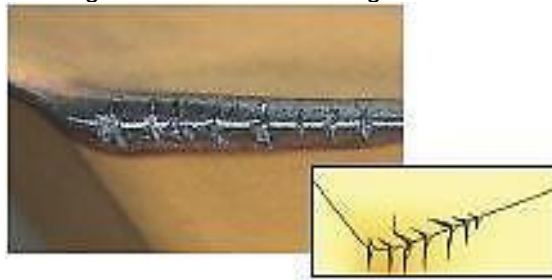


Fonte: SANDVIK (2017).

2.4.2.6 Trincas

As trincas acontecem, conforme mostra a Figura 14, pela mudança brusca de temperatura e de esforço de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Figura 14 – Trincas de origem térmica

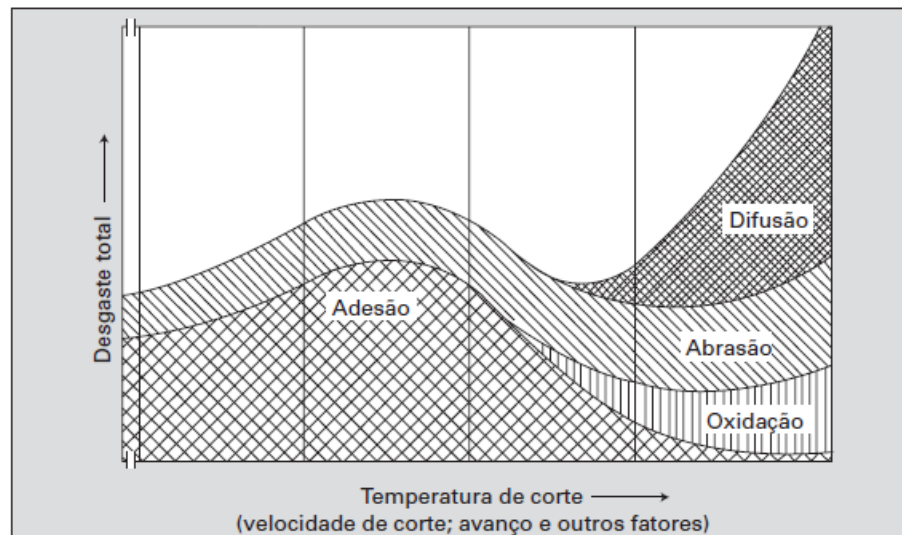


Fonte: SANDVIK (2017).

2.4.3 Mecanismos de desgaste: Adesão, abrasão, difusão e oxidação.

Durante o processo de usinagem as ferramentas de corte podem sofrer ações mecânicas e térmicas. Em função disso, acontecem os desgastes ao longo de sua utilização, o que torna necessária a sua substituição. Na medida em que as ferramentas vão desgastando, elas perdem seu próprio material durante a usinagem e, por consequência, sofrem alterações quanto a sua geometria original. A Figura 15 apresenta o diagrama dos mecanismos de desgaste de uma ferramenta de corte em função da temperatura (MACHADO et al., 2011).

Figura 15 - Mecanismos de desgaste das ferramentas de corte em função da temperatura



Fonte: MACHADO et al. (2011, p.271).

O desgaste vai acontecer em qualquer temperatura, nas mais altas os mecanismos de oxidação e difusão intensificam o processo de desgaste. Quando o ângulo de saída da ferramenta não tem mais sua geometria original por conta de seu

desgaste, acontece o desgaste por aderência (*attrition*), em que alguns fragmentos microscópicos da própria ferramenta são removidos junto com o material usinado (MACHADO et al., 2011).

2.5 Rugosidade

Após o material passar pelo processo de usinagem, a superfície da peça fica com irregularidades conhecidas como erros microgeométricos (SANTOS; SALES, 2007), que podem ser ranhuras, sulcos, estrias, escamas e crateras (GUIMARÃES, 1999). Segundo Machado et al. (2011), as irregularidades superficiais são provenientes de diversos fatores, como deformações plásticas do material, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e, em alguns casos, reações químicas.

A rugosidade pode ser medida por microscópios ou rugosímetros. O rugosímetro tem uma ponta de diamante que percorre uma trajetória linear na superfície a ser avaliada (GUIMARÃES, 1999). Antes de iniciar a medição da rugosidade é preciso configurar o equipamento para que o mesmo filtre o máximo de espaçamento entre as irregularidades, chamado de *cut-off*. Assim, as irregularidades maiores serão consideradas ondulações. O recomendado é que o *cut-off* seja, no mínimo, 2,5 vezes maior que a distância entre os picos do perfil de rugosidade (SANTOS; SALES, 2007).

2.5.1 Definição dos parâmetros de rugosidade

A rugosidade superficial pode ser avaliada por diversos parâmetros, que segundo Machado et al. (2011) e Santos e Sales (2007), são divididos em três grupos:

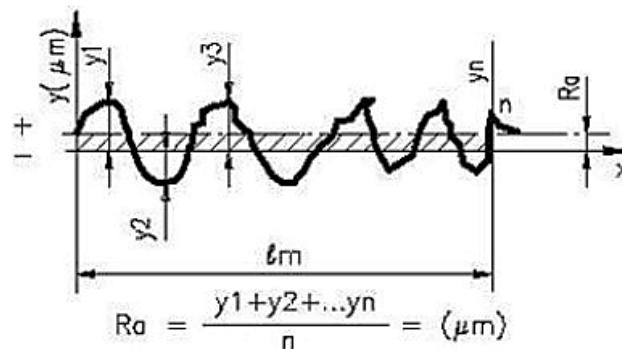
- a) Parâmetros de amplitude: Determinados pela altura dos picos e a profundidade dos vales, não considerando os espaços entre as irregularidades ao longo do perfil.
- b) Parâmetros de espaçamento: Determinados pela distância entre as irregularidades ao longo da superfície.
- c) Parâmetros híbridos: É a combinação dos parâmetros de amplitude com os de espaço.

A ABNT adotou o chamado sistema M para quantificar os desvios de rugosidade, onde uma linha média corta a superfície paralela a sua direção. Dentro do comprimento de avaliação (que deve ser cinco vezes o de amostragem) a área dos picos e vales são iguais (MACHADO et al., 2011; SANTOS; SALES, 2007; GUIMARÃES, 1999).

2.5.2 Rugosidade no torneamento

Existem diversos parâmetros para a quantificação da rugosidade: o desvio aritmético médio (R_a), o desvio médio quadrático (R_q), a altura total do perfil (R_t), entre outros. O mais utilizado para avaliar o processo de usinagem é o R_a , que é uma média aritmética dos valores absolutos das ordenadas ao longo do comprimento de amostragem, como pode ser visto na Figura 16 (MACHADO et al., 2011).

Figura 16 - Parâmetro de rugosidade R_a



Fonte: Wafatech (2017).

A rugosidade R_a pode ser calculada de maneira teórica no processo de torneamento, sendo que estes valores servem apenas para indicativos, pois não são considerados alguns fatores, como os de vibração e desgaste da aresta de corte da ferramenta. A equação (1) apresenta o cálculo da rugosidade para o processo de torneamento (MACHADO et al. 2011)

$$R_a = \frac{f^2}{31,2 \cdot r \epsilon} \quad (1)$$

Em que:

f = avanço em mm/rot

r_{ξ} = raio da ponta da ferramenta em mm.

No processo de torneamento, diversos fatores influenciam na rugosidade da peça. O avanço é o que mais gera efeito na superfície usinada, pois quanto maior o avanço utilizado, maior será a rugosidade. O raio da ponta da ferramenta também é importante, uma vez que, quanto menor o raio, maior a rugosidade. Em contrapartida, ferramentas com raio muito grande são mais propícias a vibrações, por terem uma maior área em contato com a peça (MACHADO et al., 2011; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

2.6 Aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são conhecidos por conterem acima de 12% de cromo em sua composição química (SILVA; MEI, 2010), pois é o cromo que vai garantir ao material a elevada resistência à corrosão. O cromo, ao entrar em contato com o ar, forma uma fina e resistente camada de óxido sobre o material, protegendo-o da corrosão (CHIAVERINI, 1998; MODENESI, 2001).

Dependendo da aplicação do aço inoxidável é alterada a porcentagem do cromo em sua liga, na qual pode ser acrescentado molibdênio, nióbio, titânio e nitrogênio. Os aços inoxidáveis podem ser classificados conforme sua microestrutura, podendo ser aços inoxidáveis martensíticos, ferríticos e austeníticos (CHIAVERINI, 1998).

2.6.1 Aços inoxidáveis martensíticos

Os aços inoxidáveis martensíticos possuem de 11,5% a 18% de cromo, este aço se torna martensítico após passar pelo processo de têmpera, ficando com maior resistência mecânica.

Como características mais importantes destes aços é possível citar que:

- a) São considerados ferromagnéticos;
- b) Podem ser trabalhados tanto a quente quanto a frio, somente quando o teor de carbono for baixo;

- c) Podem ficar expostos ao tempo, assim como podem ser submetidos à exposição de alguma substância química e de água por apresentarem alta resistência à corrosão. Quanto maior for o teor de carbono, mais fácil será a corrosão do aço.
- d) Para evitar a corrosão o níquel é uma boa opção. O aço inoxidável martensítico 431 possui uma boa resistência à corrosão por conter baixa quantidade de níquel, baixo teor de carbono e alto teor de cromo.
- e) Outro método para evitar a corrosão nesses aços é a têmpera, esta evita que haja precipitação dos carbonetos.

2.6.2 Aços inoxidáveis ferríticos

Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas Fe + Cr essencialmente ferríticas a todas as temperaturas, por este motivo não endurecem por tratamento térmico de têmpera, podendo ter valores de até 25% de cromo e no máximo 0,20% de carbono (SILVA; MEI, 2010; CHIAVERINI, 1998)

Os aços inoxidáveis ferríticos com menores porcentagens de cromo são o 405 e o 409. Os do tipo 405 possuem uma pequena quantidade de alumínio, o que permite sua utilização em altas temperaturas sem risco de formação de martensita (CHIAVERINI, 1998).

O único aço inoxidável desta série que não é totalmente ferrítico é o 430, bastante utilizado em locais onde se deve ter resistência à ação dos ácidos nítricos e orgânicos e à água do mar. Este aço também pode ser endurecido se resfriado de maneira rápida. Para ele, o tratamento utilizado é o recozimento para alívio de tensão e obtenção da ductibilidade (CHIAVERINI, 1998).

2.6.3 Aços inoxidáveis austeníticos

De todos aços inoxidáveis utilizados, entre 65% e 70% são aços inoxidáveis austeníticos (GRZESIK, 2008). Estes aços podem ser divididos em dois grupos, os aços ao cromo-níquel e os aços ao cromo-mangânês-níquel. O aço austenítico mais conhecido é o 18-8, que tem um teor de cromo de 18% e 8% de níquel, que melhora a resistência à corrosão e a oxidação em altas temperaturas (SILVA; MEI, 2010; CHIAVERINI, 1998).

Os aços inoxidáveis austeníticos não são endurecíveis por têmpera, nem são magnéticos. Estes aços, quando encruados, ficam com uma dureza superior, que pode ser causada pela instabilidade da austenita e esta, por sua vez, quando está sobre o efeito de encruamento, se transforma parcialmente em ferrita (CHIAVERINI, 1998; MODENESI, 2001).

Os aços inoxidáveis austeníticos da classe 304 são os mais utilizados por apresentarem menores teores de carbono que os outros aços inoxidáveis, sendo mais difícil ocorrer uma oxidação intercrystalina (CHIAVERINI, 1998). O aço inoxidável 304L é muito semelhante ao 304, porém possui um teor de carbono inferior para aprimorar ainda mais a resistência à corrosão intercrystalina. Sua dureza é de aproximadamente 180 HB (Brinell). As propriedades mecânicas de ambos os aços são idênticas (PADILHA; GUEDES, 2004).

O tratamento térmico utilizado no aço inoxidável austenítico é o processo de solubilização, que consiste em uma têmpera para garantir a estrutura austenítica na temperatura ambiente. O aço é aquecido para remover as modificações estruturais, onde são dissolvidos os carbonetos presentes, como o cromo, e depois resfriado rapidamente para evitar a precipitação de carbonetos, que acontece na faixa de 450°C a 850°C. A faixa de temperatura utilizada para a solubilização é em torno de 1000 a 1100°C (CHIAVERINI, 1998).

Por apresentarem boa ductibilidade e tenacidade, os aços inoxidáveis austeníticos tradicionais podem ser aplicados a diversas operações que utilizam conformação mecânica à frio, cujos limites de escoamento e de resistência são, respectivamente, de 205 N/mm², e de 515 N/mm², tendo um alongamento total de 40% (PADILHA ; GUEDES, 2004).

2.7 Usinabilidade dos aços austeníticos ABNT 304

A usinabilidade pode ser considerada como uma grandeza que indica a facilidade ou a dificuldade de usinar um material (MACHADO et al., 2011; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; FERRARESI, 1970). Diferentes variáveis podem ser consideradas para avaliar a usinabilidade de um material, como a vida e o desgaste da ferramenta, o acabamento superficial da peça, a força de corte e energia requerida na usinagem, a temperatura na região de corte, o tipo de cavaco gerado, dentre outras (MACHADO et al., 2011).

Na usinagem dos aços inoxidáveis austeníticos os cavacos formados tendem a formar longas fitas e empastar na superfície de saída da ferramenta, devido a sua grande ductilidade e alta taxa de encruamento, favorecendo assim a formação da aresta postiça de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Conforme Diniz, Marcondes e Coppini (2013) e Grzesik (2008), dentre as diferentes classes de aços inoxidáveis, os austeníticos são considerados os mais difíceis de serem usinados por apresentarem as seguintes características:

- a) Baixa condutividade térmica, que dificulta a saída do calor na interface cavaco-ferramenta, aumentando o desgaste da ferramenta, principalmente o desgaste de entalhe;
- b) Alto coeficiente de atrito com a ferramenta, que causa um aumento do esforço da usinagem e gera mais calor;
- c) Alto coeficiente de dilatação térmica, que dificulta a fabricação de peças com tolerâncias dimensionais muito pequenas;
- d) Difícil obtenção de um bom acabamento superficial;
- e) Dificuldade de quebra dos cavacos.

Segundo Santos e Sales (2007), estes aços apresentam dificuldades na usinagem também quanto há aderência do material na ferramenta, podendo remover alguns fragmentos e causar desgastes por lascamento. Estes aços apresentam também a tendência de endurecimento em altas temperaturas e de endurecimento da camada previamente usinada. Os cavacos têm a tendência de assumir a configuração de emaranhado.

Diante da dificuldade de usinagem dos aços inoxidáveis austeníticos e pela sua importância no processo produtivo, diversos autores têm estudado a usinagem destes tipos de aço visando entender e melhorar o processo. Freitas et al. (2017) avaliaram o efeito de diferentes tipos de lubri-refrigeração na usinagem inoxidável 304 L. Os autores comparam a utilização da mínima quantidade de lubrificação (MQL) com um sistema de refrigeração a frio e outro a seco. Os resultados mostraram que o tipo de lubrificação não influencia de maneira significativa no esforço de corte.

Camargo, Corrêa e Schroeter (2017) avaliaram a formação do cavaco no torneamento do aço inoxidável 304. Os autores obtiveram o cavaco no formato tipo arco solto para a velocidade de corte de 120 e 220 m/min. e avanço de 0,2 mm/rot.

Estudos em que são comparados os efeitos de diferentes revestimentos de

ferramentas no torneamento também se tornam interessantes para melhorar a usinagem dos aços inoxidáveis austeníticos. Fernández-Abia, et al. (2013) fizeram um comparativo entre quatro diferentes revestimentos aplicados utilizando o processo de deposição química a vapor (CVD). Os revestimentos utilizados foram AlTiSiN, AlCrSiN, AlTiN e TiAlCrN. Os melhores resultados foram os obtidos pelas ferramentas revestidas com AlTiSiN e AlTiN, pois obtiveram os menores valores de desgaste de flanco, rugosidade e esforço de corte. Para análise de comportamento do revestimento de TiC no torneamento do AISI 304, Mahdavinejad e Saeedy (2011) tiveram os menores valores de desgaste da ferramenta com velocidade de corte de 175 m/min. Os autores utilizaram 100, 125, 150, 175 e 200 m/min de velocidade de corte e avanço de 0,2, 0,3 e 0,4 mm/rot. Também fizeram os testes a seco e utilizando fluido de corte. Os melhores valores de rugosidade neste estudo foram com os menores valores de avanço e com a utilização de fluido de corte. Diversos autores de pesquisas relacionadas à usinagem têm como um de seus objetivos a redução dos impactos ambientais causados pelos óleos de corte que são utilizados nos processos de fabricação das peças. Wagh, Kulkarni e Sargade (2013) fizeram seus experimentos de usinagem do aço inoxidável utilizando uma ferramenta com revestimento de AlCrN/TiAlN por deposição física a vapor (PVD). Entre seus objetivos esteve a usinagem a seco para redução de impactos ambientais, mas sem comprometer a eficiência do processo. Segundo os autores, os resultados foram satisfatórios e o revestimento suportou os testes dentro do esperado. Outro estudo realizado por Kulkarni, Joshie Sargade (2013) foi com usinagem a seco utilizando o revestimento de AlTiCrN, para o qual os desgastes das ferramentas foram maiores com o aumento das velocidades de corte.

Como pode ser visto, o processo de usinagem é muito complexo por depender de vários fatores, como o material que será usinado, a ferramenta e os parâmetros de corte. A usinagem pode ser um processo de alto custo no produto final, por depender de fatores como o material que será utilizado, o acabamento superficial final desejado, a tolerância dimensional, entre outros. Um dos materiais em que a usinabilidade se torna difícil é a dos aços inoxidáveis austeníticos. Esses aços apresentam baixa condutividade térmica, alta ductibilidade e alto coeficiente de dilatação térmica. No processo de torneamento desses aços a ferramenta de corte pode desgastar muito rápido, sendo mais difícil a quebra dos cavacos e a obtenção de um bom acabamento superficial. Pelas diferentes dificuldades apresentadas no

processo de torneamento e por ser um aço muito utilizado, o estudo de usinabilidade desse material é importante para a melhoria do processo. Com o objetivo de analisar o comportamento do aço inoxidável austenítico 304 L no processo de torneamento, é apresentada, na sequência, a metodologia para a elaboração do presente trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi direcionado ao processo de torneamento do aço inoxidável austenítico ABNT 304 L a fim de avaliar o desgaste da ferramenta com diferentes parâmetros de corte. Para cada parâmetro foi utilizada uma nova aresta de corte da ferramenta.

Todos trabalhos experimentais foram realizados nos laboratórios do Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul – Rau. A usinagem dos corpos de prova foi realizada no laboratório de CNC e as medições de desgaste da ferramenta, suas imagens e análises foram obtidas no laboratório de ensaios de materiais. Na sequência, apresentam-se os materiais e os métodos utilizados para a realização dos ensaios experimentais.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados para efetuar os ensaios de desgaste de ferramenta, análise de rugosidade superficial e tipo do cavaco foram quatro barras de aço inoxidável austenítico ABNT 304 L com diâmetro bruto de 63 mm e comprimento de 220 mm. A Tabela 1 apresenta a composição química nominal do material utilizado.

A dureza do material foi medida com o durômetro Equilam EQTRB-250 (Figura 17)

Tabela 1- Composição química do aço inoxidável austenítico 304L

Composição %						
Cr	Ni	Mn	Si	S	C	P
19.0-20.0	8.0-12.0	0-2.0	0-1.0	0-0.03	0-0.03	0-0.045

Fonte: ASM Handbook

O valor obtido no ensaio de dureza foi de 181 HB, que é um valor muito próximo da especificação do material, dada por 180 HB.

Figura 17 - Durômetro

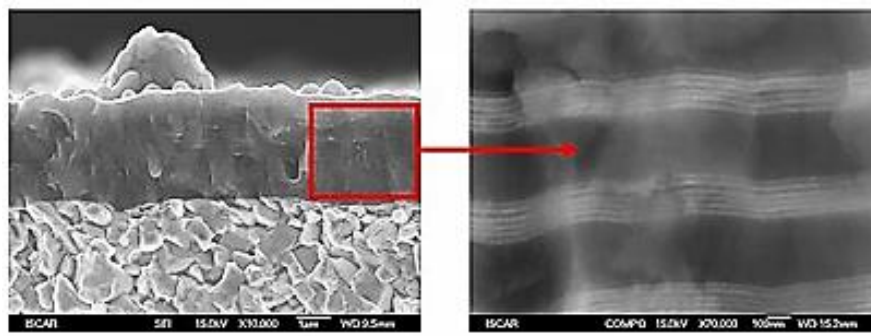


Fonte: O Autor (2017)

3.2 Ferramenta de corte

Para a realização do torneamento nos corpos de prova foi selecionada uma ferramenta de metal duro produzida com tecnologia moderna e revestimento tipo PVD, com TiAlN+TiN. Esta ferramenta do tipo TNMG160408 TF, classe IC807, do fabricante ISCAR, possui diversas nanocamadas de revestimento, conforme apresentado na Figura 18. Esta classe se enquadra no subgrupo M05-M20. A ilustração a seguir mostra uma imagem obtida com microscópio eletrônico de varredura da ferramenta utilizada. A Figura 18(a) apresenta um detalhe do material-base da ferramenta e do revestimento e a figura 18(b) mostra uma ampliação das diversas nanocamadas de revestimento da ferramenta.

Figura 18 - Nanocamadas da ferramenta classe IC807



(a)

(b)

Fonte: ISCAR do Brasil (2017)

As nanocamadas de revestimento da ferramenta são de até 50 nanômetros e, segundo o fabricante, possibilitaram um aumento significativo na resistência do revestimento, que trazem resultados favoráveis quanto ao desempenho na usinagem de aços inoxidáveis austeníticos.

A etiqueta da caixa da ferramenta indica a utilização da velocidade de corte de 200 a 300 m/min, sendo esta faixa de velocidades uma referência para diferentes materiais. Entretanto, no catálogo do fabricante, a faixa de velocidades de corte indicada para os aços inoxidáveis austeníticos é de 100 a 200 m/min. Dessa forma, esses valores foram adotados no presente trabalho. A Figura 19 apresenta a caixa e a ferramenta utilizada.

Figura 19 - ferramenta TNMG 160408



Fonte: O Autor (2017)

3.3 Equipamento utilizado no ensaio de usinagem

O equipamento utilizado para a usinagem do material foi um torno CNC da marca ROMI, modelo GL 240, com RPM máximo de 6000, mostrado na Figura 20.

Figura 20 - Torno CNC ROMI



Fonte: O Autor (2017).

3.4 Equipamentos para análise

Para a medição da rugosidade foi utilizado um rugosímetro da marca TESA, modelo Rugosurf 20. O aparelho foi configurado conforme as orientações contidas em seu manual, de acordo com a norma ISO 3274, que indica para uma rugosidade teórica entre dois e dez micrometros um percurso de medição, *cut-off* de 2,5 milímetros e comprimento total (Lt) de 12,5 milímetros. Foram medidas a rugosidade Ra e Rz. As rugosidades teóricas foram calculadas através da equação (1).

Para a análise de desgaste do inserto foi utilizado um Microscópio óptico KOZ-004 (Figura 21) e o estereoscópio do fabricante Zeiss, modelo Stemi 2000-C, com uma câmera acoplada Axio Cam ER 5s e ampliação de 5x (Figura 22).

Figura 21 - Microscópio óptico



Fonte: O Autor (2017).

Figura 22 - Estereoscópio



Fonte: O Autor (2017).

3.5 Métodos

Os corpos de prova foram preparados em um torno convencional Nardini modelo mascote. Foram retiradas as imperfeições deixadas pelo processo de corte, bem como foi efetuada a furação de centro em sua face e usinado o assento de placa para uma melhor fixação durante os ensaios de usinagem.

Para a usinagem dos corpos de prova foi utilizado o torno CNC ROMI GL 240.

A peça foi fixada na placa de três castanhas com utilização de contra ponto, conforme a Figura 23. A usinagem foi com jorro de lubrificador de óleo mineral.

Figura 23 - Usinagem do corpo de prova.



Fonte: O Autor (2017).

O número de ensaios e parâmetros de corte utilizados estão descritos na Tabela 2 e as velocidades de corte e avanços utilizados foram selecionados conforme a faixa de especificações recomendada pelo fabricante.

Tabela 2- Parâmetros de corte.

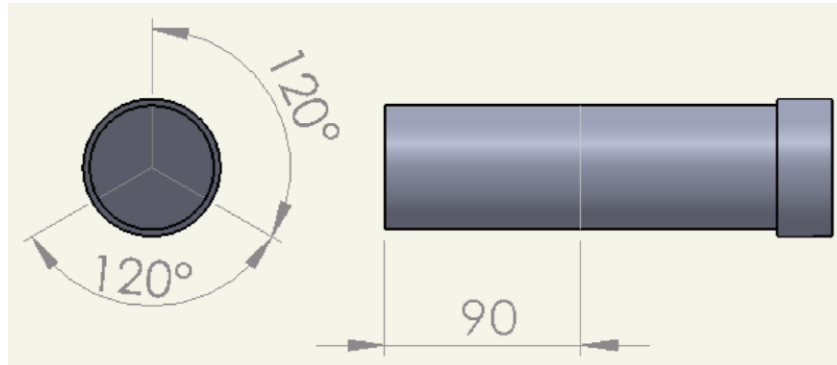
Número do ensaio	Velocidade de corte (vc), em metros por minutos	Avanço (f), em milímetros por rotação	Profundidade de corte (ap), em milímetros	Tempo de corte em minutos
1	100	0,18	1,5	2,5
2	100	0,24	1,5	2,5
3	100	0,3	1,5	2,5
4	150	0,18	1,5	2,5
5	150	0,24	1,5	2,5
6	150	0,3	1,5	2,5
7	200	0,18	1,5	2,5
8	200	0,24	1,5	2,5
9	200	0,3	1,5	2,5

Fonte: O Autor (2017)

Para cada velocidade de corte foram utilizados três avanços diferentes. Para cada ensaio foi realizada uma réplica, dessa forma totalizando 18 ensaios. O tempo de corte foi fixado em dois minutos e meio.

Foi efetuada a medição da rugosidade em três diferentes pontos do diâmetro do corpo de prova, a partir de uma distância de 90 mm da face, conforme mostra a Figura 24. Essas medições ocorreram após 2,5 minutos de usinagem, totalizando três medições de rugosidade por ensaio, e efetuando a média das medições. A Figura 25 mostra uma imagem do rugosímetro e o eixo usinado.

Figura 24 - Posições das medições da rugosidade



Fonte: O Autor (2017)

Figura 25 - Medição da rugosidade



Fonte: O Autor (2017)

Foi efetuada uma análise de variância (ANOVA) no *software* Minitab. O *software* foi alimentado com a média dos valores das rugosidades das duas repetições.

Para cada ensaio foram retiradas amostras de cavacos para análises quanto ao seu formato. As amostras de cavacos foram comparadas para identificar o melhor parâmetro para um cavaco mais favorável.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise das rugosidades

Na Tabela 3 estão os respectivos valores em micrometros (μm) da rugosidade média (R_a) para cada ensaio realizado, incluindo os da réplica. Optou-se pela rugosidade R_a por ser o parâmetro de rugosidade mais utilizado.

Tabela 3 – Posições das medições da rugosidade

Avanço – f (mm/rot)	Velocidades de Corte - vc (m/min)		
	100	150	200
0,18	1,376	1,906	1,253
	1,258	1,904	1,24
	1,295	1,945	1,272
	2,358	1,457	1,523
	2,601	1,452	1,556
	2,296	1,47	1,645
	2,549	3,157	2,417
0,24	2,57	3,168	2,419
	2,56	3,165	2,574
	2,505	2,843	3,086
	2,583	2,793	3,077
	2,518	2,824	3,062
	3,92	5,257	5,062
0,30	3,923	4,685	4,932
	3,93	4,67	5,052
	4,906	3,959	5,56
	4,978	3,997	5,602
	4,833	4,05	5,292

Fonte: O Autor (2017).

Com os resultados da rugosidade foi efetuada a ANOVA (análise de variância). Os resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - ANOVA – 95% de Confiança

Fonte de Variação	g.l.	SQ	MQ	F	Valor-p
Avanço - f (mm/rot)	2	85,415	42,707	211,48	< 0,001
Velocidades de Corte - vc (m/min)	2	0,373	0,187	0,92	0,404
Erro	49	9,895	0,202		
Total	53	95,684			

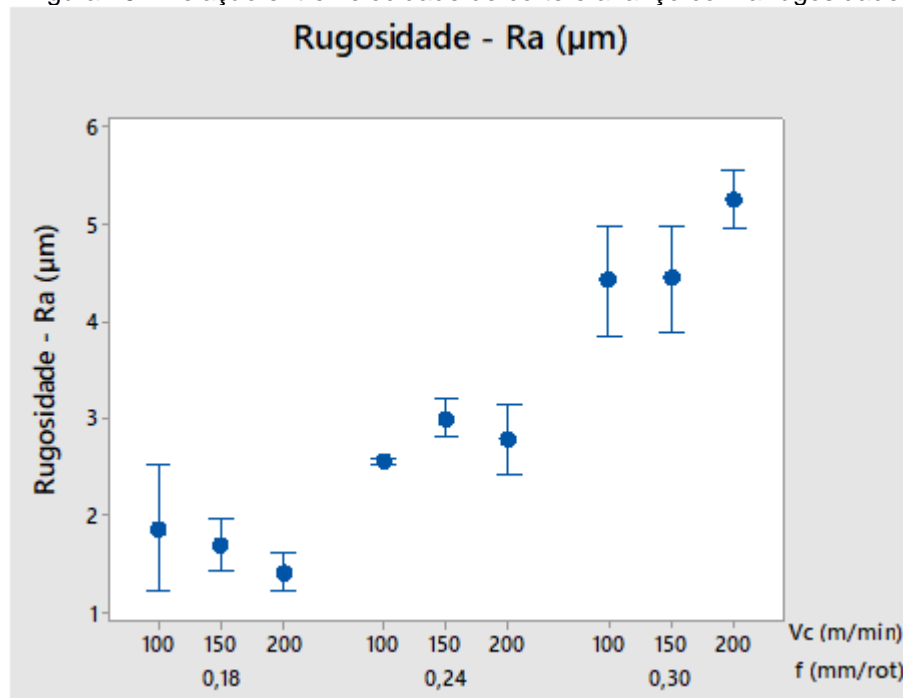
Fonte: O Autor (2017)

Conforme pode ser verificado na Tabela 4, o valor “p” para o avanço ficou inferior a 0,05. Este resultado indica com 95% de confiança que há diferenças significativas na rugosidade quando é alterado o avanço.

Pela análise da ANOVA pode-se afirmar com 95% de confiança que nestes ensaios a velocidade de corte não interfere na rugosidade superficial da peça, pois o valor “p” ficou superior a 0,05.

A partir destes resultados foi gerado o gráfico da relação entre a velocidade de corte e o avanço com a rugosidade apresentado na Figura 26. Através dos intervalos de variação apresentados nesta figura pode-se garantir que não há mudanças significativas na rugosidade quando se altera a velocidade de corte ensaiada (100-200 m/min). Estes resultados indicam que provavelmente não ocorreu a formação de APC que, segundo MACHADO et al. (2011), influencia diretamente na rugosidade superficial.

Figura 26 - Relação entre velocidade de corte e avanço com a rugosidade



Fonte: O Autor (2017)

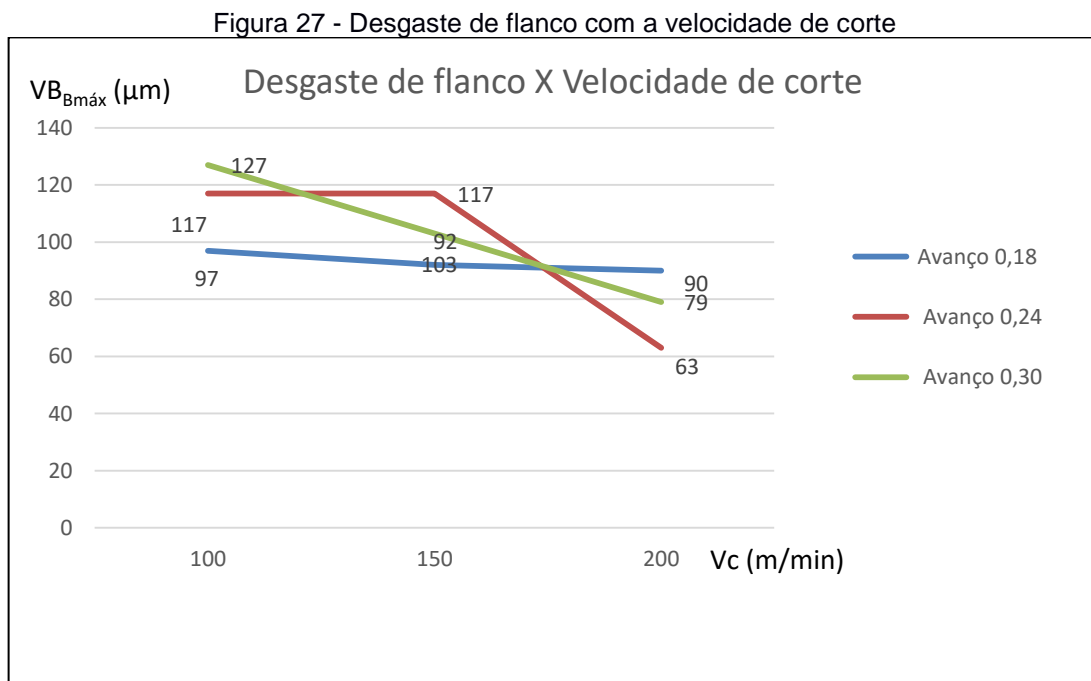
Analisando os intervalos de variação apresentados na Figura 26 é visível que o avanço interfere na rugosidade. Estes resultados estão de acordo com os autores Machado et al. (2011) e Diniz, Marcondes e Coppini (2013), que afirmam que quanto maior o avanço, maior é a rugosidade superficial da peça. Por outro lado, é possível

observar, na Figura 26, que não há variação significativa da rugosidade com a velocidade de corte para um mesmo valor de avanço.

Os resultados de rugosidades obtidos ficaram próximos do valor teórico determinado com a equação (1). Para uma velocidade de corte de 200 m/min e avanço de 0,24 mm/rot a rugosidade teórica Ra foi de 2,307 μm e a rugosidade medida foi de 2,772 μm .

4.2 Análise de desgaste da ferramenta

Os valores das medições dos desgastes de flanco de cada aresta foram analisados, de modo a comparar a velocidade de corte com o desgaste da ferramenta. Esta comparação pode ser observada na Figura 27, que permite analisar a influência da velocidade de corte no desgaste da ferramenta.



Fonte: O Autor (2017)

Os resultados mostram uma redução de desgaste com o aumento da velocidade de corte para os três avanços avaliados. Este resultado é diferente do apresentado por Kulkarni, Joshi e Sargade (2013), que obtiveram um aumento no desgaste quando a velocidade de corte foi aumentada. Entretanto, os autores

realizaram usinagem do aço AISI 304 a seco, que pode aumentar a temperatura de corte e o desgaste em velocidades maiores.

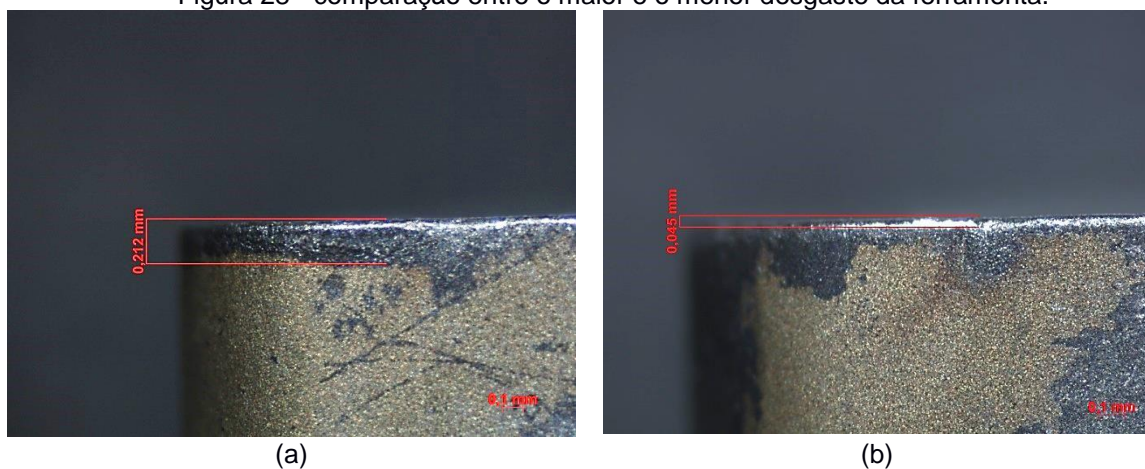
Por outro lado, os valores obtidos no presente trabalho estão coerentes com o trabalho de Mahdavinejad e Saeedy (2011), que mostram uma redução no desgaste na ferramenta ao usinar o aço 304 com o aumento da velocidade de corte de 100 a 180 m/min, e um aumento do desgaste entre as velocidades de 180 a 200 m/min.

Uma possível explicação sobre a redução entre as velocidades de 100 a 200 m/min é que, em velocidades menores tem-se uma maior tendência de adesão e desgaste. Para a velocidade de 200 m/min tem-se uma menor adesão e um mecanismo predominante de desgaste por abrasão, resultando no menor desgaste obtido.

Para velocidades superiores a 200 m/min é possível, que ocorra um aumento de desgaste por abrasão junto com o desgaste por difusão, resultando em um aumento no desgaste da ferramenta. Este comportamento pode ser observado na figura 15, apresentado na revisão de literatura, no qual para velocidades de corte maiores, tem-se um maior efeito dos mecanismos de difusão, abrasão e oxidação.

Os resultados obtidos neste trabalho indicam que a ferramenta utilizada possui um bom desempenho quanto ao desgaste, na faixa de velocidade especificada pelo fabricante. A Figura 28 apresenta um comparativo entre o maior e o menor desgaste da ferramenta.

Figura 28 - comparação entre o maior e o menor desgaste da ferramenta.



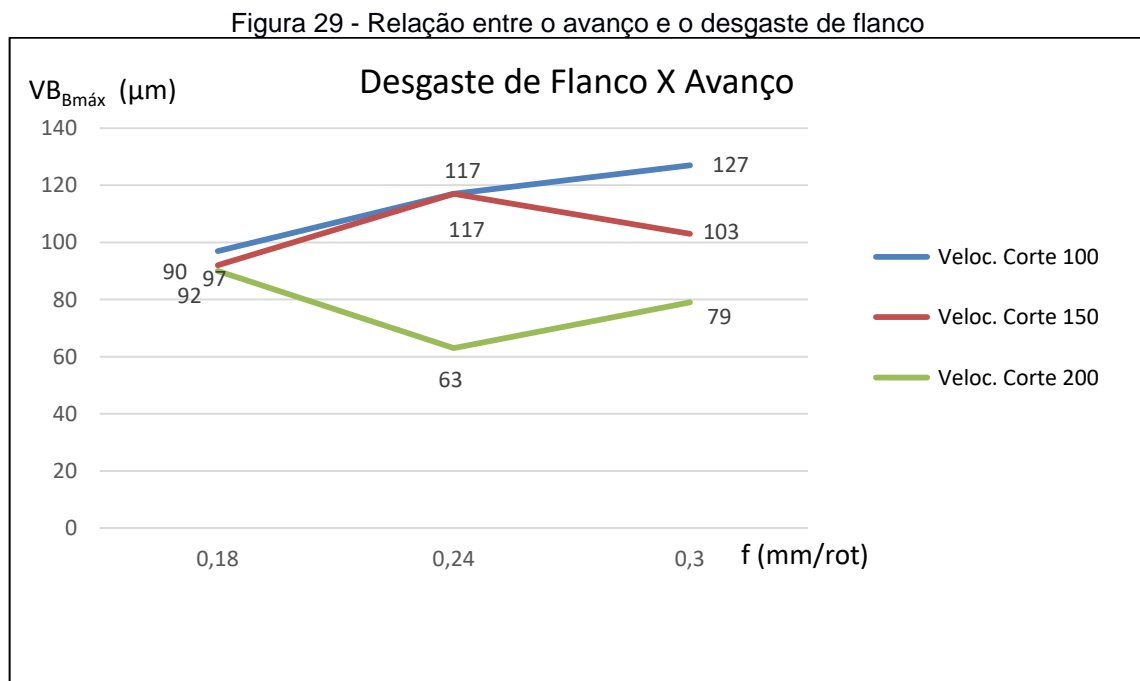
(a) Maior desgaste de flanco da ferramenta ($f=0.3\text{mm/rot}$, $vc=100\text{ m/min}$).
 (b) Menor desgaste de flanco da ferramenta ($f=0.24\text{ mm/rot}$, $vc=200\text{ m/min}$)
 Fonte: O Autor (2017).

Na Figura 29 tem-se a relação obtida entre o avanço e o desgaste de flanco

para as diferentes velocidades de corte ensaiadas.

Os resultados obtidos e apresentados na Figura 29 não permitem afirmar qual é o efeito do aumento do avanço no desgaste da ferramenta. Os valores do desgaste para o avanço de 0,18 mm/rot e 0,3 mm/rot ficaram aproximadamente constantes, nas velocidades de corte de 150 e 200 m/min. Por outro lado, houve um aumento do desgaste com o avanço para uma velocidade de corte de 100 m/min.

Estes resultados mostram um pequeno efeito do avanço no desgaste da ferramenta e estão de acordo com a afirmação de Machado et al. (2011) de que o avanço não é o maior causador do desgaste da ferramenta, mas sim a velocidade de corte.



Fonte: O Autor (2017).

Os valores de desgaste da ferramenta obtidos dos ensaios foram baixos, o que mostra a alta resistência da ferramenta de corte utilizada, todavia este fato causou uma dificuldade na medição dos desgastes. Para resolver este problema foram avaliados os desgastes com auxílio do microscópio óptico com aumento de 100X e a medição com o estereoscópio.

4.3 Análise dos cavacos

Os cavacos gerados no processo de torneamento foram retirados para comparação e estão apresentados na Figura 30.

Figura 30 - Amostra dos cavacos.



Fonte: O Autor (2017).

Como pode ser verificado, utilizando o avanço de 0,18 mm/rot, a forma dos cavacos é do tipo helicoidal arruela curto. Com a velocidade de corte de 150 e 200 m/min, além de ser do tipo helicoidal arruela curto, os cavacos tiveram uma tendência de formar emaranhado. Este resultado está de acordo com Machado et al. (2011), apresentado na Figura 5, que mostra um cavaco tipo fita para baixos avanços e de pequenos arcos para avanços maiores.

A medida que se aumenta o avanço, os cavacos tendem a quebrar mais facilmente. Segundo Machado et al. (2011) e Santos e Sales (2007), essa é uma das maneiras utilizadas para o controle do cavaco de materiais mais dúcteis, como o aço inoxidável austenítico 304 L. Para os avanços de 0,24 e 0,3 mm/rot os cavacos ficaram na forma de arco conectado.

A Figura 31 mostra como é perceptível a segmentação dos cavacos, sendo esta uma das características dos aços inoxidáveis.

Figura 31- Cavacos segmentados.



Fonte: O Autor (2017).

Os resultados obtidos mostram que, apesar das obras apresentadas na bibliografia relatarem certa dificuldade na usinagem dos aços inoxidáveis austeníticos, a ferramenta de corte utilizada neste trabalho mostrou-se eficaz. O desgaste verificado foi bastante reduzido e o formato da geometria da ferramenta favoreceu a quebra.

5 CONCLUSÃO

Após a análise dos resultados obtidos, afim de avaliar o processo de torneamento do aço inoxidável austenítico ABNT 304L, pode-se concluir que:

- a) Para o ensaio realizado, a velocidade de corte não é um fator determinante quanto à rugosidade superficial da peça.
- b) O parâmetro de corte que mais influencia a rugosidade superficial da peça é o avanço. Quanto maior o avanço, maior tende a ser a rugosidade da peça.
- c) Com velocidade de corte de 200 m/min e avanço de 0,24 mm/rot, a média da rugosidade Ra foi de 2,772 μm , ficando aproximadamente 20% acima da calculada para este parâmetro.
- d) Os resultados mostraram uma redução no desgaste com o aumento da velocidade de corte dentro da faixa avaliada.
- e) O avanço não foi o maior causador do desgaste da ferramenta, mas sim a velocidade de corte;
- f) Entre os parâmetros utilizados o que menos ocasionou desgaste na ferramenta foi velocidade de corte de 200 m/min e o avanço de 0,24 mm/rot.
- g) O revestimento de TiAlN+TiN da ferramenta teve um bom desempenho na análise realizada, pois resistiu a 2,5 minutos de corte sem apresentar grandes desgastes de flanco.
- h) A forma do cavaco mais favorável encontrada foi do tipo arco conectado, com os avanços de 0,24 e 0,3 mm/rot. Para o menor avanço, de 0,18mm/rot, foi obtido um cavaco do tipo helicoidal com tendência a formação de emaranhados, conforme relatado pela bibliografia.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Conforme apresentado neste trabalho os desgastes das ferramentas foram muito pequenos, para uma melhor análise poderia ser aumentado o tempo de corte e fazer a usinagem com mais réplicas.

Fazer novos experimentos com velocidades de corte maiores para verificar o comportamento do desgaste.

Fazer a curva de desgaste completa de Taylor e utilizar outros revestimentos das ferramentas para a comparação.

Efetuar a usinagem sem a utilização de fluido de corte para análise do cavaco e a diferença de temperatura.

Comparar a usinabilidade de diferentes aços inoxidáveis.

REFERÊNCIAS

AÇOS inoxidáveis. Disponível em:

<http://www.favorit.com.br/sites/default/files/tabelas/acos_inoxidaveis_0.html>.

Acesso em: 3 set. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. ASM Handbook. **Properties and selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys**. 10. ed, v.1, 2005. 1618p.

CAMARGO, J. F. ; CORRÊA, J. ; SCHROETER, R. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 9., 2017, Joinville. **Análise da formação de cavacos no torneamento do aço inoxidável AISI304 com emprego de um sistema de interrupção súbita de corte (QSD)**. [s. L.]: Abcm, [21--]. 9 p.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1998.

COPPINI, N. L. **Usinagem Enxuta: Gestão do Processo**. São Paulo: Artliber, 2015. 135 p.

CUTTING Speed. Disponível em:

<<http://www.iscar.com/eCatalog/Grade.aspx?grade=IC807&item=5592001&fnum=448&mapp=IS&app=0>>. Acesso em: 28 out. 2017.

DESGASTE nas arestas de corte. Disponível em:

<http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting_tool_materials/wear_on_cutting_edges>. Acesso em: 7 set. 2017.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2013. 270 p.

FERNÁNDEZ-ABIA, A. I. et al. Behaviour of PVD Coatings in the Turning of Austenitic Stainless Steels. **Procedia Engineering**, v. 63, p.133-141, 2013. Elsevier BV.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Blucher, 1970. 751 p.

FREITAS, S. et al. Análise da rugosidade e esforços no corte ortogonal do aço 304I com diferentes sistemas de lubrificação. In.: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. **Anais...** Joinville-SC: Abcm, 2017,

GUIMARÃES, V. A. **Controle Dimensional e Geométrico: Uma introdução à Metrologia Industrial**. Passo Fundo: Ediupf, 1999. 161 p.

GRZESIC, W. **Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling and Applications**. [s.l.]: Elsevier, 2008. 478 p.

INSERTOS. Disponível em: <<http://www.shimatools.com.br/serviços/insertos-intercambiaveis/>>. Acesso em: 7 set. 2017.

KULKARNI, Atul P.; JOSHI, G. G.; SARGADE, V. G. Dry Turning of AISI 304 Austenitic Stainless Steel Using AlTiCrN Coated Insert Produced by HPPMS Technique. **Procedia Engineering**, v. 64, p.737-746, 2013. Elsevier BV.

MACHADO, Á. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011. 397 p.

MAHDAVINEJAD, R. A.; SAEEDY, S. Investigation of the influential parameters of machining of AISI 304 stainless steel. **Sādhanā**, v. 36, p.963-970, 6 dez. 2011.

METAL duro revestido. Disponível em: <http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting_tool_materials/coated_cemented_carbide#7>. Acesso em: 21 set. 2017.

MODENESI, Paulo J. **Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis**. São Paulo: Acesita, 2001. 100 p.

NEW Catalogs. Disponível em: <<http://www.iscardobrasil.com.br/newarticles.aspx/countryid/4/newarticleid/1453>>. Acesso em: 18 nov. 2017.

PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C. **Aços Inoxidáveis Austeníticos: Microestrutura e Propriedades**. Curitiba: Hemus, 2004. 170 p.

PARÂMETROS de Rugosidade: Rugosidade média (Ra). Disponível em: <<http://wafatech.blogspot.com.br/2009/10/>>. Acesso em: 24 nov. 2017.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Artliber, 2007. 246 p.

SANDVIK DO BRASIL. **Manual Técnico de Usinagem: Torneamento-Fresamento-furação-Mandrilamento-sistemas de fixação**. São Paulo: Sandvik, 2005.

SHAW, Milton Clayton. **Metal Cutting Principles**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 2005.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 646 p.

SOUZA, S. A. **Composição Química dos Aços**. São Paulo: Blucher, 1989. 134 p.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. (ed.). **Metal Cutting**. 4. ed. USA: Butterworth–heinemann, 2000. 464 p.

WAGH, S. S.; KULKARNI, A. P.; SARGADE, V. G. Machinability Studies of Austenitic Stainless Steel (AISI 304) Using PVD Cathodic Arc Evaporation (CAE) System Deposited AlCrN/TiAlN Coated Carbide Inserts. **Procedia Engineering**, v. 64, p. 907-914, 2013. Elsevier BV.