

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET-RJ**

**Avaliação do desgaste da ferramenta de corte no
torneamento de aço inoxidável duplex S31803**

Marília Alice Piedade

Prof. Orientadora: Tatiane de Campos Chuvas

**Rio de Janeiro
Dezembro de 2017**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET-RJ**

**Avaliação do desgaste da ferramenta de corte no
torneamento de aço inoxidável duplex**

Marília Alice Piedade

Projeto final apresentado em cumprimento às
normas do Departamento de Educação Superior
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Prof. Orientadora: Tatiane de Campos Chuvas

**Rio de Janeiro
Dezembro de 2017**

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Marly das Graças Bezerra Piedade e Sérgio Ricardo Piedade, pelo amor incondicional, dedicação irrestrita e suporte durante toda a minha trajetória acadêmica e profissional.

Aos meus amigos, Alexandre Soares, Beatriz Leite, Danielle Jorge e Juliana Ribeiro, por dividir momentos difíceis e pelo apoio e amor durante a evolução da minha graduação.

À professora Tatiane de Campos Chuvas, de quem pude obter todos os direcionamentos necessários, atenção e paciência durante a execução do projeto.

Aos professores Matheus Campolina Mendes e Luiz Felipe Guimarães, pelo suporte e permissão para a realização das etapas experimentais.

Aos monitores Guilherme Bittencourt e Natalia Noce pelo comprometimento com o meu projeto.

Ao CEFET/RJ - Maracanã, por ser a instituição de ensino a qual eu escolhi para traçar minha trajetória acadêmica, suportando toda a minha graduação e se tornando um lar acolhedor.

RESUMO

O desenvolvimento de novos materiais, aplicados na indústria, aumentam os desafios na área de usinagem, pois a dinâmica de corte e o comportamento da ferramenta de corte é diretamente influenciada pelo tipo de material que está sendo usinado. Por esta razão, o desgaste prematuro de uma ferramenta de corte pode resultar em aumentos significativos nos custos de produção. Assim, o estudo dos mecanismos de desgaste em ferramentas de corte utilizadas em usinagem de aços alavanca o estudo científico no que tange o desenvolvimento de tecnologias que minimizem esses desgastes, aprimorem os processos e otimizem os parâmetros de corte. Aços inoxidáveis duplex, considerados aços de baixa usinabilidade, possuem microestrutura bifásica, composta por ferrita e austenita, apresentando boas propriedades mecânicas. Entretanto, são poucos os dados acerca do comportamento dos mesmos quando usinados. O objetivo deste trabalho foi analisar o desgaste de ferramentas de corte no torneamento de aço inoxidável duplex S31803, focando o estudo na influência da velocidade de corte no tipo de desgaste e no tempo de vida útil da ferramenta utilizada. Os tipos de desgaste mais observados como resultado deste estudo foram: adesão de material à superfície da peça e desgaste de flanco. Complementarmente, foram realizadas análises microestruturais das peças usinadas afim de verificar a camada atingida pela usinagem.

Palavras-chaves: desgaste de ferramenta, torneamento, velocidade de corte, aço inoxidável duplex.

ABSTRACT

The development of new materials, applied in the industry, increases the challenges in the machining area, because the cutting dynamics and the behavior of the cutting tool are directly influenced by the type of material that is being machined. For this reason, the premature wear of a cutting tool can result in significant increases in production costs. Thus, the study of the tool's wear mechanisms, in tools used at machining process, leverages the scientific study, in reference of the technology development, which can minimize these wear, improve the process and optimize cutting parameters. Duplex stainless steels, considered low machinability steels, have a biphasic microstructure, composed of ferrite and austenite, presenting good mechanical properties. However, there are few data about their behavior when machined. The purpose of this work was to analyze the wear of cutting tools in the turning of S31803 duplex stainless steel, focusing the study on the influence of the cutting speed on the type of wear and on the useful life of the tool used. The types of wear most observed as a result of the study were: adhesion of material to the surface and flank wear. In addition, microstructural analysis was performed on machined parts to verify the layer affected by machining.

Keywords: tool wear, turning, cutting speed, duplex stainless steels

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objetivo	1
1.3. Metodologia	2
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Aço Inoxidável	3
2.1.1. Aço Inoxidável Duplex	6
2.2. Torneamento	7
2.2.1. Torneamento de Aço Inoxidável Duplex	11
2.3. Desgaste de Ferramenta de Corte	14
2.3.1. Cavaco	18
2.3.2. Integridade Superficial	20
3. Materiais e Métodos	24
3.1. Aço inoxidável duplex S31803	24
3.2. Preparação das Amostras	24
3.3. Torneamento	25
3.4. Ferramenta de corte	26
3.5. Análise de desgaste	27
4. Resultados e Discussão	28
4.1. Desgaste das ferramentas de corte	28
5. Conclusão	38
6. Sugestões para trabalhos futuros	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Microestrutura Ferrítica.....	4
Figura 2: Microestrutura Martensítica	4
Figura 3: Microestrutura Austenítica	5
Figura 4: Microestrutura do Aço Inoxidável UNS S31803.....	6
Figura 5: Movimentos de corte para operações de torneamento	8
Figura 6: Operações de usinagem realizadas no torno, além do próprio torneamento: (a) faceamento, (b) sangramento, (c) rosqueamento, (d) recartilhado	9
Figura 7: Superfícies da ferramenta de corte	11
Figura 8: Ângulos ferramenta de corte	11
Figura 9: Comparativo de índices de usinabilidade entres diferentes tipos de aço, ao serem usinados por ferramentas de carbonetos e de aço rápido	12
Figura 10: Comparação dos parâmetros de usinagem para torneiar aços inoxidáveis duplex com um avanço de carboneto cementado com vida útil para a ferramenta de quatro minutos.....	13
Figura 11: Mecanismo de desgaste por adesão	15
Figura 12: Mecanismo de desgaste por abrasão	15
Figura 13: Mecanismos de desgaste	16
Figura 14: Desgaste de Flanco	17
Figura 15: Desgaste de Cratera	17
Figura 16: Trinca	18
Figura 17: Formatos de cavaco	19
Figura 18: Classificação de acabamento	20
Figura 19: Camadas do material	21
Figura 20: Efeitos das médias dos parâmetros sobre a rugosidade para operações de acabamento.....	23
Figura 21: Representação das dimensões das amostras	25
Figura 22: Pastilhas utilizadas na usinagem das amostras	26
Figura 23: Superfície superior da pastilha utilizada na condição 1 ($V_c = 30$ m/min): (a) nova, (b) $L_c = 160$ mm, (c) $L_c = 320$ mm, (d) $L_c = 480$ mm	28
Figura 24: Superfície superior da pastilha utilizada na condição 3 ($V_c = 60$ m/min): (a) nova, (b) $L_c = 160$ mm, (c) $L_c = 320$ mm, (d) $L_c = 480$ mm	29

Figura 25: Superfície superior da pastilha utilizada na condição 5 ($Vc = 100$ m/min): (a) nova, (b) $L_c = 160$ mm, (c) $L_c = 320$ mm, (d) $L_c = 480$ mm	30
Figura 26: Superfície de saída da pastilha utilizada na condição 1 ($Vc = 30$ m/min): (a) nova; (b) $L_c = 160$ mm; (c) $L_c = 320$ mm; (d) $L_c = 480$ mm	31
Figura 27: Superfície de saída da pastilha utilizada na condição 3 ($Vc = 60$ m/min): (a) nova; (b) $L_c = 160$ mm; (c) $L_c = 320$ mm; (d) $L_c = 480$ mm	31
Figura 28: Superfície de saída da pastilha utilizada na condição 5 ($Vc = 100$ m/min): (a) nova; (b) $L_c = 160$ mm; (c) $L_c = 320$ mm; (d) $L_c = 480$ mm	32
Figura 29: Trinca após 480 mm usinados à velocidade de 75 m/min	33
Figura 30: Desgaste de flanco após 480 mm usinados à velocidade de 30 m/min	33
Figura 31: Desgaste de flanco cotado após 480 mm usinados à velocidade de 50 m/min	34
Figura 32: Desgaste de flanco após 480 mm usinados à velocidade de 60 m/min	34
Figura 33: Velocidade de corte (m/min) x Desgaste de flanco (μm)	35
Figura 34: Camada atingida: (a) condição 2 ($Vc = 50$ m/min) e (b) condição 6 ($Vc = 150$ m/min)	36
Figura 35: Microestrutura dos cavacos analisados após 480 mm usinados, nas seguintes condições: (a) 30 m/min, (b) 50 m/min, (c) 60 m/min, (d) 75 m/min, (e) 100 m/min, (f) 150 m/min	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição Química do Aço Inoxidável Duplex UNS S31803 (% de peso).....	7
Tabela 2: Valores indicativos de parâmetros de corte para torneamento de aços inoxidáveis duplex.....	13
Tabela 3: Valores de rugosidade obtidos nos ensaios de acabamento com altas velocidades de corte	23
Tabela 4: Composição química do aço inoxidável duplex UNS S31803 (% de peso) (A240/A240M, 2004)	24
Tabela 5: Propriedades mecânicas do aço inoxidável duplex UNS S31803 (ASTM E8/E8M,2011)	24
Tabela 6: Velocidades de corte utilizadas na usinagem das amostras	26
Tabela 7: Parâmetros da pastilha	27

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Motivação

O setor industrial vem evoluindo e alguns componentes mecânicos estão sendo aplicados em condições severas de carregamento e meio, o que impulsiona o desenvolvimento de novos materiais que possuam as propriedades mecânicas necessárias para o funcionamento seguro desses componentes. Em paralelo ao desenvolvimento desses novos materiais surge o desafio trabalhá-los por meio de diferentes processos de fabricação mecânica com baixo custo e alta produtividade, sem prejudicar seu desempenho em serviço (Diniz *et al.*, 1999).

Os aços inoxidáveis duplex foram desenvolvidos devido a necessidade de se aliar características de aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos, principalmente nos requisitos de resistência mecânica, resistência à corrosão e tenacidade. Mesmo sendo caracterizados por serem aços de boa trabalhabilidade sob o âmbito da fabricação mecânica, a usinabilidade dos aços inoxidáveis duplex é descrita como baixa em virtude do material apresentar uma estrutura bifásica (ferrita e austenita). Dessa forma, o desgaste das ferramentas de corte utilizadas na usinagem dessa classe de materiais é muito agressiva e acaba por aumentar os custos de produção. O desgaste de ferramentas de corte em processos de usinagem depende de fatores como material da peça, material da ferramenta e dos parâmetros de corte, como a profundidade de corte, avanço, velocidade de corte. O estudo da influência que esses fatores exercem sobre o desgaste de ferramentas de corte é de grande importância para o desenvolvimento tecnológico e melhoria contínua deste tipo de ferramenta em processos de usinagem, principalmente para materiais de baixa usinabilidade como os aços inoxidáveis duplex (Raymundo *et al.*, 2014; Silva, 2007).

1.2 Objetivo

O objetivo deste projeto é estudar a influência da velocidade de corte no desgaste da ferramenta usinagem em um processo de torneamento de aço inoxidável duplex UNS S31803 e assim contribuir, com dados experimentais, para a otimização de parâmetros de corte para a

usinagem dessa classe de materiais. Nesse trabalho foram usados valores de profundidade de corte baixo, para caracterizar a operação como acabamento. O aço inoxidável escolhido para o projeto trata-se de um material de alta aplicação industrial, o qual movimentava expressivamente a indústria; além disso, ainda não existem muitos dados na literatura sobre de usinagem para este aço.

1.3 Metodologia

Esse trabalho foi realizado com base em análises experimentais, obtidas a partir dos cálculos dos tempos de corte, juntamente com microscopia óptica das arestas de corte utilizadas, que possibilitaram a caracterização do desgaste das mesmas. A parte escrita abrange uma Revisão Bibliográfica sobre os assuntos pertinentes ao escopo do projeto seguida do capítulo Materiais e Métodos, onde são descritos todos os procedimentos experimentais realizados, além da metodologia de análise dos dados obtidos. A parte experimental do trabalho resumiu-se em: usinagem das barras metálicas, preparação das amostras e análise microscópica das amostras, das ferramentas de corte. No capítulo Resultados e Discussão são apresentados os resultados obtidos nos procedimentos experimentais e a correlação dos parâmetros de usinagem com o desgaste das ferramentas de corte após processo de torneamento. Ao final são apresentadas as Conclusões e algumas Sugestões para Trabalhos Futuros, pois o estudo sobre a usinagem de aços inoxidáveis ainda tem carência de novas pesquisas.

CAPÍTULO 2

Revisão Bibliográfica

2.1 – Aço Inoxidável

Os aços inoxidáveis são materiais que apresentam altíssima resistência à corrosão, decorrente da formação de uma camada passiva, cuja função é proteger a superfície metálica dos ataques dos agentes corrosivos. A passividade dos metais, é regida pela adição de elementos de liga, sendo os principais elementos propiciadores desta propriedade o cromo e o níquel; cobre, silício, molibdênio e alumínio também podem formar camada passiva, porém, em menor grau, se comparados aos elementos anteriores. O cromo é o elemento que mais contribui para aumento de resistência à corrosão, quando adicionado em altos teores. Sendo assim, os aços inoxidáveis, são caracterizados pelo elevado teor de Cr, que confere não só elevada resistência à corrosão e oxidação, como também resistência a trabalho em temperaturas altas. Aços inoxidáveis podem ser divididos em 3 (três) subclasses principais: ferríticos, martensíticos e austeníticos. Contudo, outros tipos de aços inoxidáveis foram desenvolvidos, como os duplex e superduplex (Chiaverini, 1977).

Os aços inoxidáveis ferríticos são caracterizados por possuir altos teores de cromo (principal elemento de liga) e baixos teores de carbono, apresentando elevada resistência à corrosão. Elementos como molibdênio, silício, manganês, titânio, alumínio e nióbio também são adicionados para melhoria de propriedades (Leandro, 2013). Em geral, são mais baratos que os aços inoxidáveis austeníticos. Microestruturalmente, esse material é composto por ferrita, conforme apresentado na Figura 1, a maioria dos aços chamados “ferríticos” pode apresentar formação austenítica se aquecido acima de determinadas temperaturas. Durante o resfriamento, pode haver a transformação da austenita em martensita, fazendo com que a estrutura bruta seja predominantemente martensítica e ferrítica. Em altas temperaturas, até mesmo aços ferríticos com alto teor de cromo podem apresentar austenita em sua microestrutura (Colpaert, 2008).

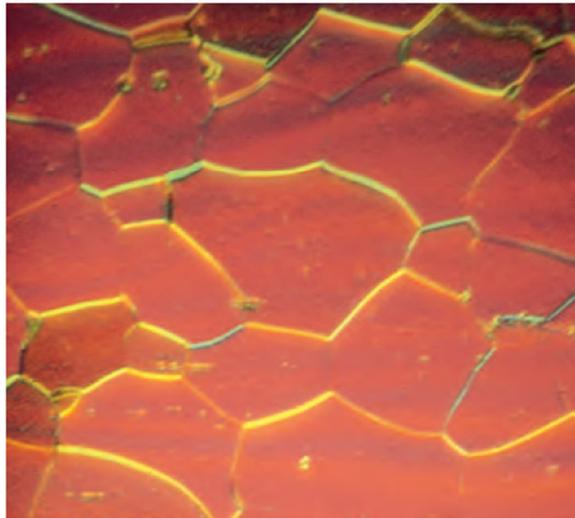


Figura 1: Microestrutura Ferrítica (TMR Stainless, 2012).

Os aços inoxidáveis martensíticos são aços endurecíveis em virtude dos maiores teores de carbono, se comparados aos ferríticos e austeníticos; em muitos casos, nitrogênio pode ser adicionado para melhoria da resistência. Para que a soldabilidade desse aço inoxidável possa ser melhorada, adiciona-se níquel, e reduz-se a quantidade de carbono. O enxofre é o elemento responsável por melhorar a usinabilidade, quando adicionado (Outokumpu, 2013). Esses aços são austenitizados a temperaturas elevadas, para que os carbonetos se dissolvam por completo, possibilitando a obtenção de austenita uniforme. A Figura 2 mostra a microestrutura desse tipo de aço (Colpaert, 2008).

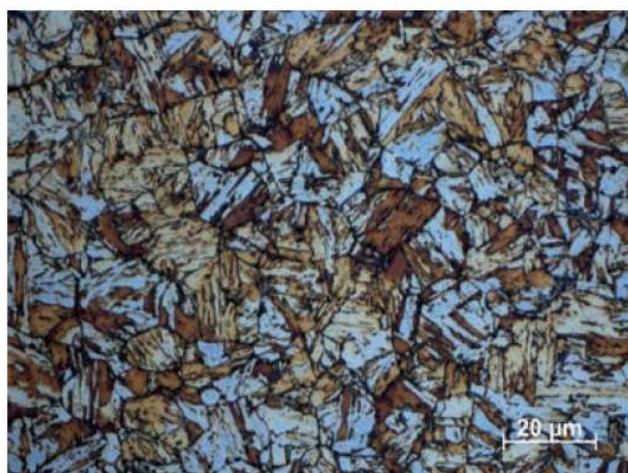


Figura 2: Microestrutura Martensítica (Outokumpu, 2013).

Classificados como aços não endurecíveis, os aços inoxidáveis austeníticos são ligas de Fe-Cr-Ni e possuem boa tenacidade e ductilidade, mesmo em temperaturas baixas. Nesse tipo de aço, a austenita não sofre decomposição significativa após a conformação a quente, sendo assim, a austenita obtida inicialmente durante o trabalho a quente, é mantida. Aplica-se o tratamento térmico de solubilização, para que haja dissolução dos carbonetos nocivos à resistência à corrosão, uma vez que o aço não tenha sido submetido à trabalho a frio, esse tratamento térmico não irá alterar tamanho e forma dos grãos. A microestrutura final não é facilmente alterada por tratamentos térmicos, ela pode ser observada na Figura 3 (Colpaert, 2008). Esse aço é o que oferece maior dificuldade de usinagem, pois apresentam comportamento plástico durante o corte, o que gera cavacos longos e embaraçados. Por ser um material muito resistente, a força de avanço durante o corte tende a ser alta, o que acarreta aumento de temperatura, característica essa agravada pela baixa condutividade térmica do aço. Assim, todos esses fatores acabam por culminar em baixa vida útil da ferramenta e degradação da superfície usinada (Bork, 1995).

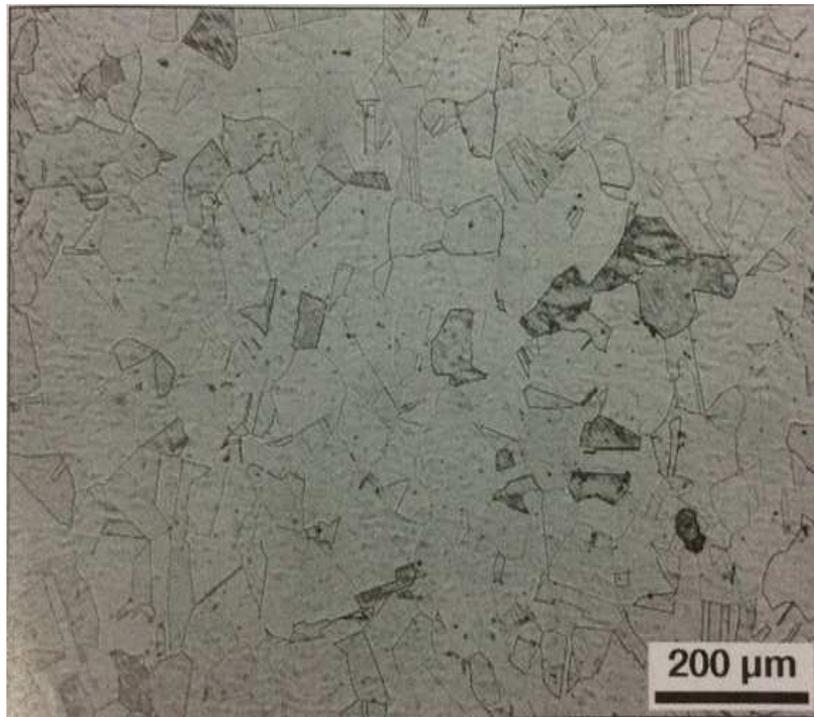


Figura 3: Microestrutura Austenítica (Colpaert, 2008).

2.1.1 Aço Inoxidável Duplex

Os aços inoxidáveis duplex são caracterizados por possuírem as fases ferrítica e austenítica em proporções aproximadas de 1:1 (Figura 4), possuindo altas adições de elementos de liga como cromo, níquel, molibdênio e nitrogênio (Lee & Su, 1999). Foram desenvolvidos devido a necessidade de se aliar características de aços ferríticos e austeníticos, principalmente em resistência mecânica, resistência à corrosão e tenacidade. No geral, esses aços são conhecidos por apresentarem boa soldabilidade, tenacidade, ductilidade e resistência mecânica (Outokumpu, 2013; Raymundo *et al.*, 2014). Eles possuem a característica de formar a camada passiva em diferentes meios de exposição, o que garante resistência à corrosão a estes aços. A elasticidade do aço inoxidável duplex é duas vezes superior se comparada à aços de fase única, como os ferríticos e austeníticos. A alta resistência mecânica e a dilatação térmica próxima a dos aços carbono, fazem com que esse aço tenha ampla aplicabilidade em projeto, pois permitem equipamentos mais leves, seguros e com custo de manutenção bastante reduzido, além de aumento de vida útil. O custo do aço inoxidável duplex é aumentado devida à adição de elementos de liga, principalmente níquel e molibdênio (Loureiro, 2010).

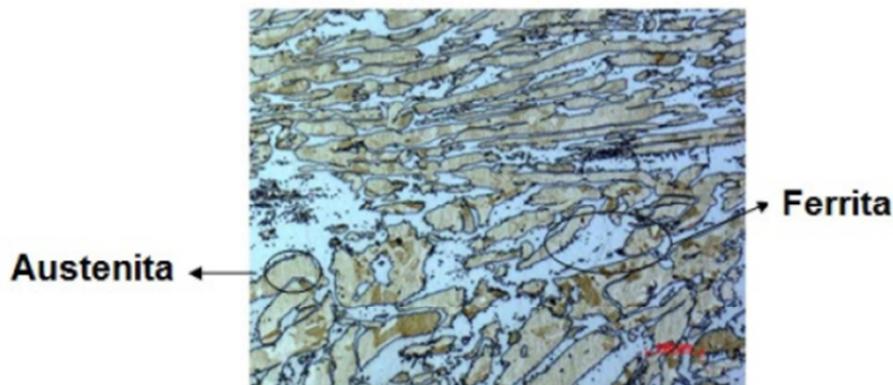


Figura 4: Microestrutura do Aço Inoxidável UNS S31803 (Raymundo *et al.*, 2014.)

Cada um dos elementos constituintes do aço tem influência sobre as propriedades mecânicas do aço, dadas as devidas proporções em que são adicionados. Em se tratando do aço UNS S31803, na Tabela 1 observa-se o baixo teor de carbono, o que afeta diretamente a formação de austenita, que por sua vez afeta negativamente a resistência mecânica, porém, a formação de carbonetos é reduzida, o que afeta a corrosão intergranular. Conforme citado anteriormente, o cromo é o elemento responsável por conferir a principal característica mecânica desejável à um aço inoxidável: alta resistência à corrosão; além disso, o Cr propicia

o aumento da resistência à oxidação em altas temperaturas. Outro elemento responsável por conferir esta última propriedade é o silício, que também pode gerar aumento da resistência à oxidação. O manganês melhora consideravelmente a ductilidade à quente. O níquel é o principal responsável pelo aumento de ductilidade e dureza, bem como da formação da estrutura austenítica. O molibdênio também é um agente colaborador para o aumento das resistências mecânica e à corrosão. O nitrogênio aumenta a resistência mecânica do aço, formando austenita. (Outokumpu, 2013).

Tabela 1: Composição Química do Aço Inoxidável Duplex UNS S31803 (% de peso) (Zhang *et al.*, 2012).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Fe
0,021	0,46	1,52	0,008	0,001	22,36	5,72	3,02	0,17	Balanço

Dadas as propriedades acima, o aço duplex UNS S31803 tem ampla aplicabilidade em ambientes extremamente corrosivos e agressivos, tais como: indústria *offshore* (principalmente em tubulações de perfuração), vasos de pressão, trocadores de calor, indústria nuclear (sistemas de refrigeração) e indústria química (Loureiro, 2010). Há ainda aplicação na indústria de papel e celulose, tubulações de produção de água para processo ou injeção deste insumo (Raymundo *et al.*, 2014). Em se tratando de indústria petroquímica ele é bastante utilizado em unidades de dessalinização, dessulfuração e equipamentos para destilação. A indústria química aplica este tipo de aço em colunas de fracionamento e reatores de uréia, centrífugas e tanques, principalmente (Loureiro, 2010).

2.2 – Torneamento

Os processos de fabricação de peças metálicas, em geral, originam peças de superfícies consideradas grosseiras e sem acabamento, além de, por muitas vezes, impossibilitarem a obtenção de certas geometrias específicas para cada fim. Assim surge o processo de usinagem, que possibilita um melhor acabamento superficial e dimensões consideradas bem mais precisas (Chiaverini, 1986).

Especificamente, o torneamento é uma operação de usinagem que consiste na retirada gradual de material no movimento rotacional da peça em torno de seu próprio eixo. Neste processo o cavaco é removido através de uma ferramenta de um gume cortante, que

permanece durante toda a operação, presa no porta ferramenta, enquanto a peça gira em torno de seu próprio eixo (Chiaverini, 1986). Para tal existem três movimentos que regem a operação de torneamento, considerados movimentos ativos: movimento de corte, movimento de avanço e movimento efetivo de corte (Figura 5). O movimento de corte é o movimento rotativo realizado entre a ferramenta e a peça, considerado o movimento principal. O movimento de avanço desloca a ferramenta ao longo da superfície da peça, propiciando a remoção contínua de cavaco da peça, enquanto o movimento efetivo de corte é o resultante da composição dos movimentos de corte e de avanço. Existem também os chamados movimentos passivos, que embora não resultem em remoção de material tem sua importância no processo. Nesta categoria se enquadram os movimentos de ajuste, correção, aproximação e recuo (Diniz *et al.*, 1999).

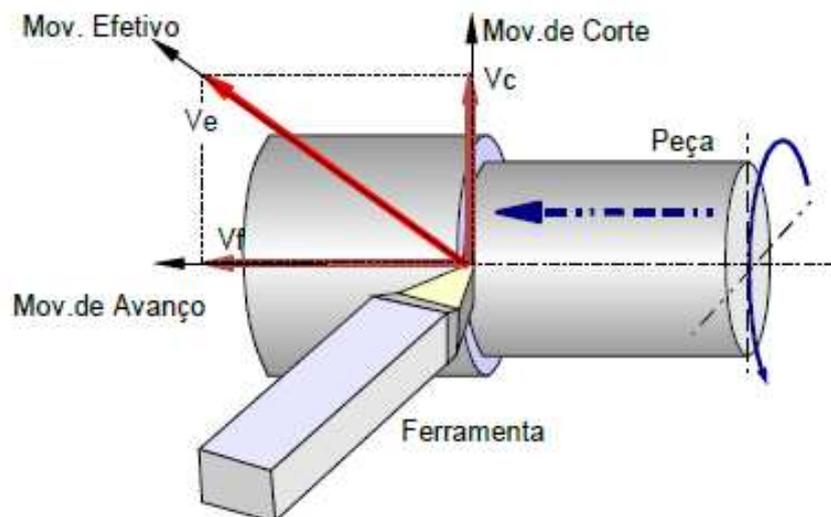


Figura 5: Movimentos de corte para operações de torneamento (Stoeterau, 2004)

Diversas operações de usinagem podem ser realizadas com o torno, a maioria com ferramentas monocortantes, como os torneamentos interno e externo e o faceamento. No sangramento, a ferramenta deixa uma espécie de sulco na peça. Na operação de rosqueamento, exige ferramenta monocortante projetada com geometria que dê forma ao filete da rosca. O recartilhamento é feito através de uma ferramenta especial denominada recartilha, composta por dois roletes de material duro, onde cada um dos roletes gira apoiado em seus próprios eixos; nesse contexto, a ferramenta é pressionada contra a superfície da peça (que se encontra em movimento de rotação) de forma a imprimir o padrão na peça. O padrão de recartilhado pode ser variável. A Figura 6 exemplifica os diversos modos de operação de

um torno (Groover, 2014).

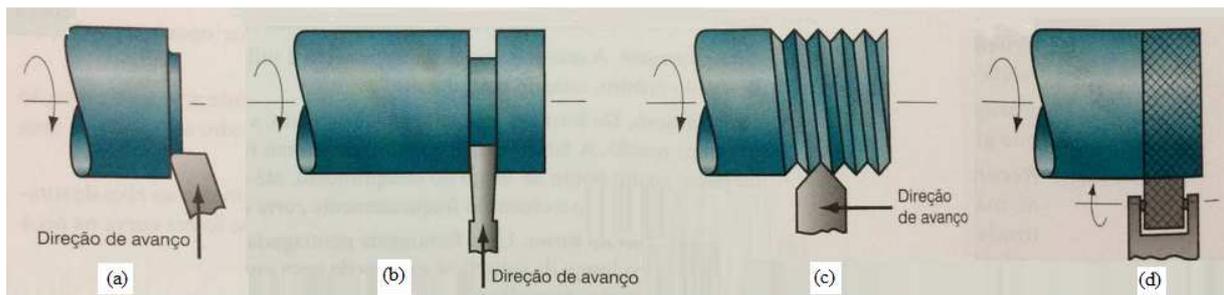


Figura 6: Operações de usinagem realizadas no torno, além do próprio torneamento: (a) faceamento, (b) sangramento, (c) rosqueamento, (d) recartilhado (Groover, 2014).

Para realizar operações de usinagem é necessário estar atendo a escolha dos parâmetros de corte, que influenciam diretamente na formação do cavaco pois cavacos longos, muito comum na usinagem de aços inoxidáveis austeníticos, geram desgaste prematuro da ferramenta de corte. Além disso, a área de contato entre cavaco e ferramenta é extensa e as temperaturas são elevadas na região de corte, o que vem a somar com o desgaste da ferramenta (Silva, 2007)

Com relação aos parâmetros de corte, a velocidade de corte, que indica a velocidade superficial da peça com relação à ferramenta, é um dos principais parâmetros de corte no torneamento (Trent & Wright, 2000). Para a correta determinação da velocidade de corte também deve ser levado em consideração o acabamento da peça a ser usinada. A velocidade de corte pode ser definida, matematicamente, segundo a Equação 1:

$$V_c = \frac{\pi D n}{1000} \quad (1)$$

Onde:

V_c = Velocidade de Corte (m/min)

D = Diâmetro inicial da peça (mm)

n = Rotação do eixo árvore (rpm)

A profundidade de corte é a medida da distância entre a superfície da peça e o fundo do corte. Sendo assim a Equação 2 descreve profundidade corte em função dos diâmetros inicial e final da peça a ser trabalhada:

$$p = \frac{d_1 - d_2}{2} \quad (2)$$

Onde:

p = Profundidade de Corte (mm)

d_1 = Diâmetro inicial da peça (mm)

d_2 = Diâmetro final da peça (mm)

O deslocamento da ferramenta de corte a cada rotação indica o avanço, que por sua vez determina a velocidade de avanço, conforme apresenta a Equação 3 (Chiaverini, 1986):

$$V_f = fn \quad (3)$$

Onde:

V_f = Velocidade de Avanço (mm/min)

f = Avanço (mm/rev)

n = Rotação do eixo árvore (rpm)

A ferramenta de corte possui influência direta na qualidade final do material usinado, formação e modo de saída do cavaco, e desgaste da ferramenta. Cada uma das superfícies e ângulos da ferramenta (Figuras 7 e 8) possui atuação própria no processo de usinagem (Stoeterau, 2002).

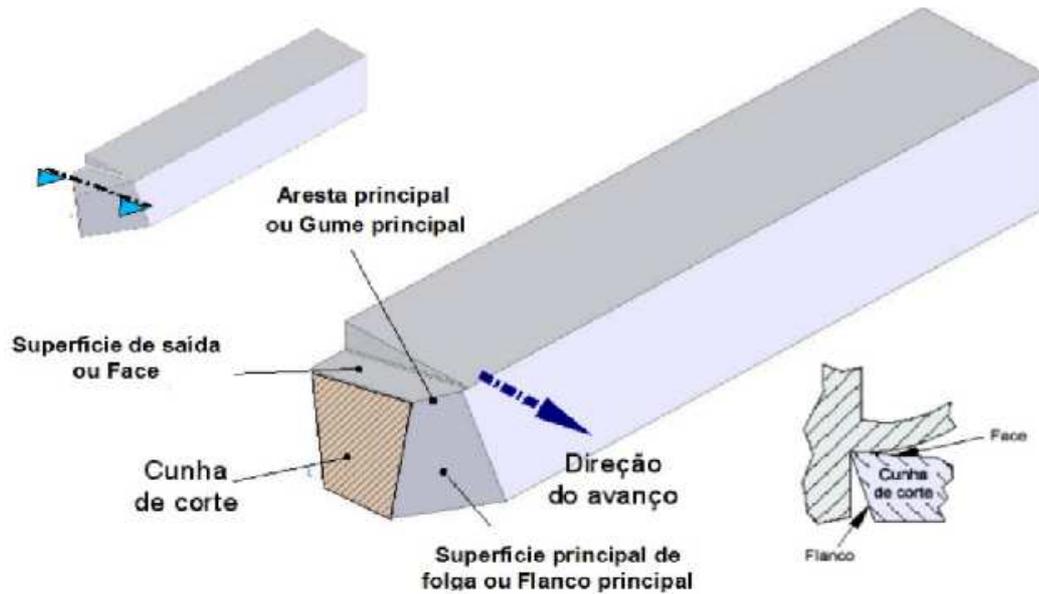


Figura 7: Superfícies da ferramenta de corte (Stoeterau, 2002).

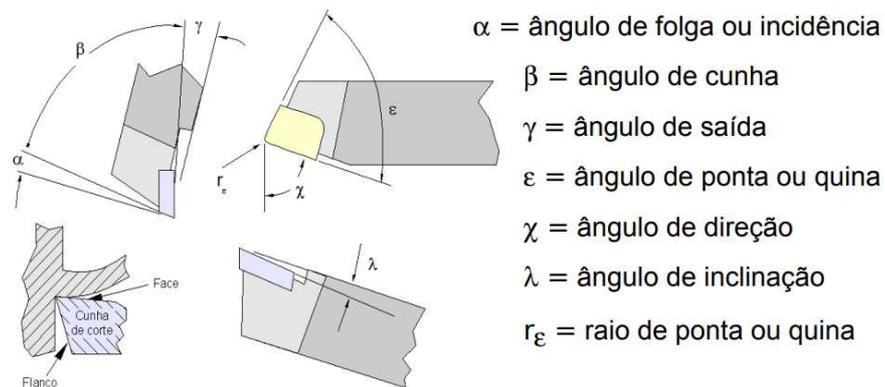


Figura 8: Ângulos ferramenta de corte (Stoeterau, 2002).

2.2.1 Torneamento de Aço Inoxidável Duplex

Os aços inoxidáveis duplex são conhecidos por apresentar baixa usinabilidade. Esses aços possuem o menor teor possível de enxofre, o que torna a quebra de cavaco um problema comum e recorrente; além disso, as forças de corte necessárias são mais altas e o desgaste da ferramenta de usinagem ocorre rapidamente. Esses materiais são caracterizados por possuir alto limite à tração, alta taxa de encruabilidade e alta ductilidade, sendo essas propriedades conhecidas por exercer grande influência sobre a usinabilidade da peça, pois são determinantes na formação de aresta postiça de corte na ferramenta. A baixa condutividade térmica dos aços inoxidáveis faz com que às temperaturas de corte sejam bastante altas, o que

pode fazer com que haja aderência do cavaco junto à ferramenta, uma vez que combinado ao fator alta temperatura, há também o fator alta pressão exercida pelo cavaco na ferramenta (Silva, 2007).

A Figura 9 apresenta um comparativo do índice de usinabilidade de diferentes tipos de aço inoxidável duplex com o aço inoxidável austenítico 316 ao se usar com ferramentas de metal duro e aço rápido. Analisando a tabela é possível observar a diferença de usinabilidade entre os aços, principalmente ao se utilizar ferramental de carboneto, as diferenças entre as composições químicas irão influenciar então, na usinabilidade do material, mesmo pertencendo a uma mesma classe (TMR Stainless, 2012).

Para obtenção de velocidades mais altas, é indicado o uso de ferramentas de corte fabricadas em carboneto, pois estas são capazes de propiciar velocidades bem maiores, se comparadas às velocidades geradas por ferramentas de aço rápido. Entretanto, ferramentas de carboneto irão exigir mais atenção no que diz respeito à rigidez, tanto da peça, quanto da ferramenta. A Figura 10 mostra um comparativo de velocidade e avanço, no torneamento de aço inoxidável duplex (TMR Stainless, 2012):

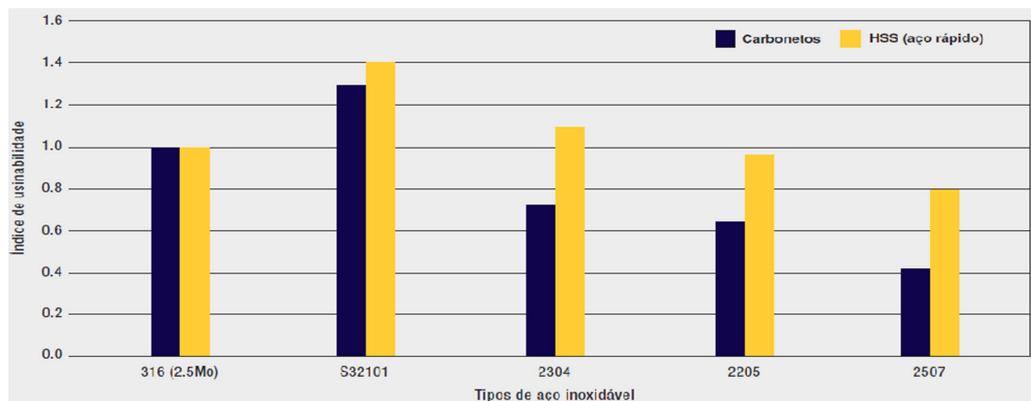


Figura 9: Comparativo de índices de usinabilidade entre diferentes tipos de aço, ao serem usinados por ferramentas de carbonetos e de aço rápido (TMR Stainless, 2012).

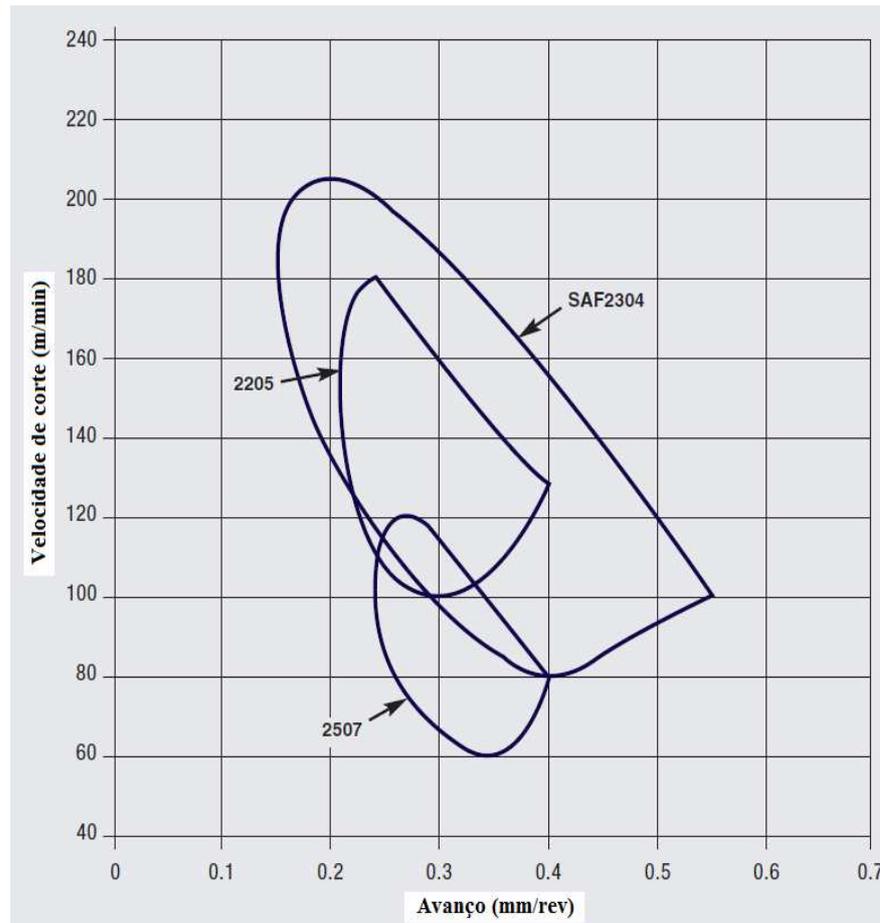


Figura 10: Comparação dos parâmetros de usinagem para torneamento de aços inoxidáveis duplex com um avanço de carboneto cementado com vida útil para a ferramenta de quatro minutos (TMR stainless, 2012).

Ainda utilizando o aço S32101 como comparativo, deve-se levar em consideração a rigidez tanto da peça, quanto da ferramenta. A Tabela 2 relaciona as velocidades de corte indicadas para cada tipo de acabamento e ferramental (TMR Stainless, 2012):

Tabela 2: Valores indicativos de parâmetros de corte para torneamento de aços inoxidáveis duplex (TMR Stainless, 2012 modificado).

Aço Inoxidável (ou dados de usinagem)	Carbonetos		Ferramentas de Aço Rápido
	Desbaste	Acabamento	
	V_C (m/min)	V_C (m/min)	Velocidade (m/min)
S32101	170-240	200-280	20-30
2304	120-160	150-210	18-25
2205	90-120	120-160	15-20
2507	50-70	70-105	10-15

2.3 – Desgaste de Ferramentas de Corte

As ferramentas de corte podem ser constituídas de diferentes materiais, e as condições de trabalho irão determinar qual o material de ferramenta mais adequado. Os principais materiais para ferramentas de corte são: Aço carbono (comum ou com adição de elementos de liga), aços rápidos, ligas fundidas, cerâmicos e metal duro. Existem ainda outros materiais que podem ser utilizados, porém menos usuais (Barbosa, 2004).

Nos processos de usinagem, o atrito entre a peça e a ferramenta e a deformação plástica sofrida pela camada superficial da peça na formação do cavaco geram uma grande taxa de calor de trabalho (Lima *et al.*, 2017). Geralmente, pode-se distinguir três estágios de desgaste da ferramenta:

- Estágio I: Estágio onde a ferramenta sofre desgaste acelerado, relacionada à adaptação do sistema, conforme o processo é realizado, a taxa de desgaste passa a ser menor.
- Estágio II: A taxa de desgaste apresenta-se constante com o tempo, a ferramenta encontra-se adaptada ao processo de usinagem.
- Estágio III: Aumento acentuado da taxa de desgaste, caso o corte tenha continuidade dentro dessa condição, leva a ferramenta à quebra, devido à tensões e temperaturas elevadas. Esse estágio deve ser evitado a todo custo, pois uma vez atingido, o tempo para o colapso da ferramenta pode ser curto e uma quebra em serviço pode gerar prejuízos e custos elevados

Existem diversos mecanismos de desgaste, que são diretamente influenciados pelos parâmetros de corte, tipo de operação, utilização de fluido de corte, entre outros fatores pertinentes ao processo de usinagem. Destacam-se quatro mecanismos principais de desgaste de ferramentas: adesão, abrasão, oxidação e difusão.

A adesão (Figura 11) é o mecanismo de desgaste mais propício de acontecer à baixas velocidades, onde o fluxo de saída do cavaco é irregular. Ocorre a partir da deposição de material na superfície da ferramenta e pode levar à formação da chamada aresta postiça de corte, que pode resultar em um corte instável. Quando destacados, pela pressão na região de corte, os fragmentos depositados são arrastados, carregando junto à eles, grãos de material da ferramenta de corte, resultando no desgaste da mesma.

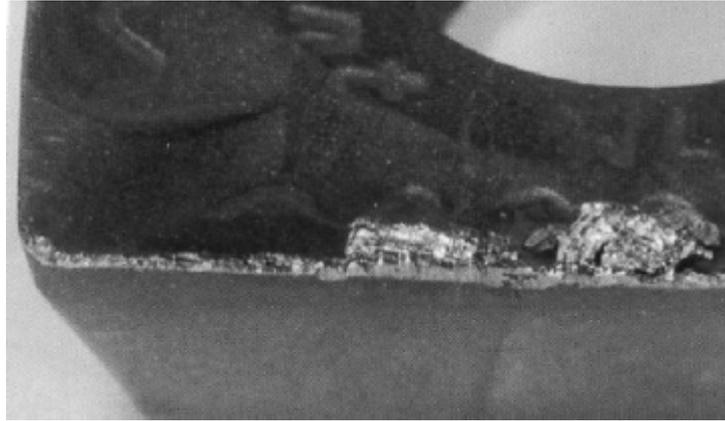


Figura 11: Mecanismo de desgaste por adesão (Stoeterau, 2004).

A abrasão pode ser descrita como um “arrancamento” de material da ferramenta e ocorre quando partículas soltas, entre a peça e a ferramenta, removem material da superfície, ou até mesmo quando precipitados duros no cavaco, ou na ferramenta, realizam a mesma remoção de material da superfície. Esse mecanismo de desgaste pode levar à deformação plástica ou fratura frágil, com microsulcamento, microcorte ou microlascamento. Esse mecanismo é o principal agente na formação do desgaste de flanco (Machado, 2009). A Figura 12 exibe um desgaste abrasivo:

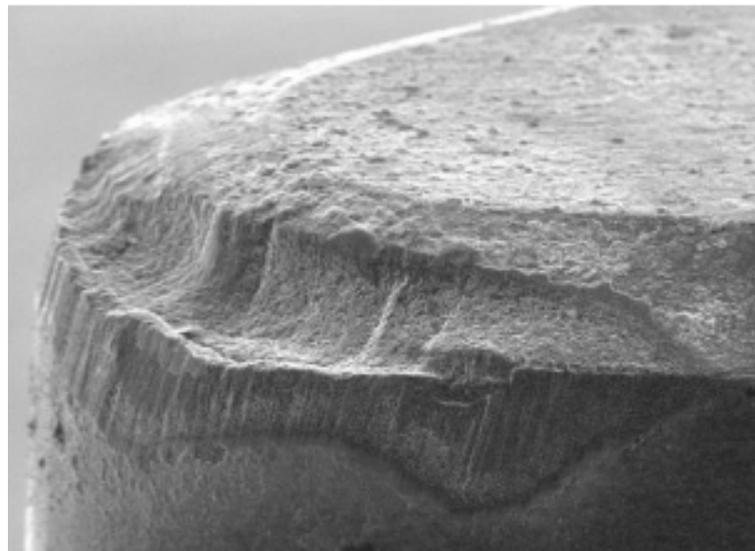


Figura 12: Mecanismo de desgaste por abrasão (Stoeterau, 2004).

Os fluidos de corte podem ter na sua composição ar e/ou água, que atacam a superfície da ferramenta gerando oxidação para a maioria dos metais, principalmente nas regiões onde as temperaturas são mais elevadas. Assim, é formada uma camada porosa, removida através

de atrito, acarretando por sua vez, desgaste da ferramenta. De acordo com Diniz *et al.*, 1999 esse tipo de mecanismo de desgaste costuma ocorrer na interface de contato cavaco-ferramenta, em decorrência do acúmulo de ar nesta região (Machado, 2009).

A difusão é beneficiada pela afinidade química entre os elementos constituintes dos materiais da peça e da ferramenta de corte. Contudo, a temperatura e tempo de corte também são fatores influenciadores nesse processo. Em usinagem, a difusão se torna mais evidente com o acréscimo da velocidade de corte e de avanço. A difusão prejudica a ferramenta de corte pois faz com que a mesma perca elementos importantes para o cavaco e propicia combinações com elementos do cavaco, que podem resultar na perda de carbonetos abrasivos, em troca de outros menos resistentes. O processo de difusão ocorre à níveis microscópicos, sendo assim, a superfície que sofre difusão, permanece lisa (Machado, 2009).

A Figura 13 apresenta diagrama que relaciona os mecanismos de desgaste de abrasão, adesão, difusão e oxidação em função dos parâmetros de corte (temperatura, velocidade, avanço, por exemplo). Se a temperatura for considerada, os mecanismos de adesão e abrasão estão presentes em baixas temperaturas, já à temperaturas elevadas, difusão e oxidação são observados; a difusão cresce em escala exponencial. O aumento da temperatura de corte agrava muito o desgaste total da ferramenta.

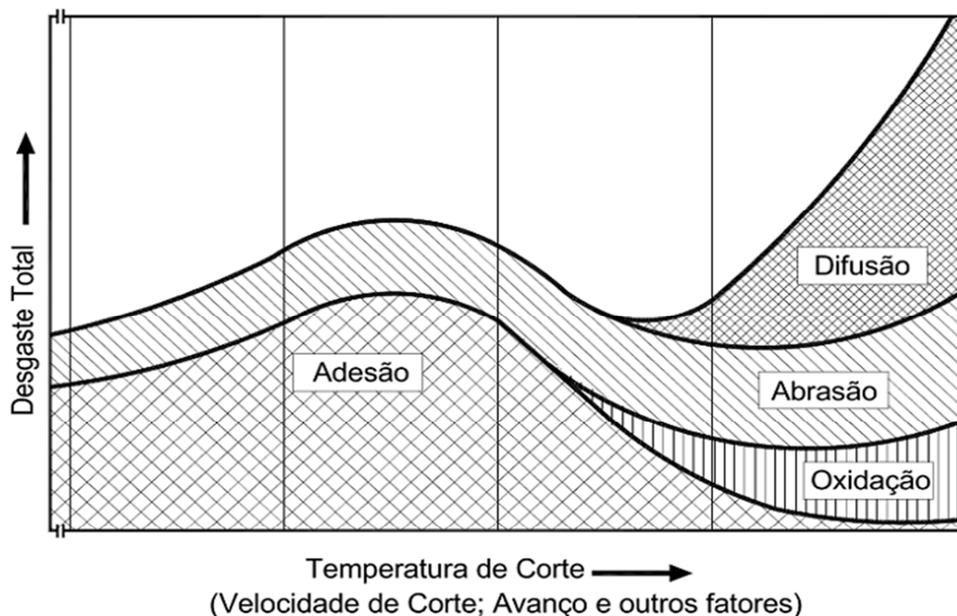


Figura 13: Mecanismos de desgaste (Machado, 2009)

A combinação dos diversos mecanismos de desgaste, pode ocasionar em desgastes específicos, como por exemplo o desgaste de flanco, representado na Figura 14, ele aparece

nas superfícies de folga da ferramenta, quando atinge a aresta principal. Pode acarretar em vibrações, devido ao aumento das forças de corte e também da temperatura. Caso o desgaste de flanco ocorra na aresta secundária, o dano estará diretamente ligado ao acabamento superficial da peça, uma vez que esta aresta está relacionada ao controle dimensional e acabamento superficial (Amorim, 2002).

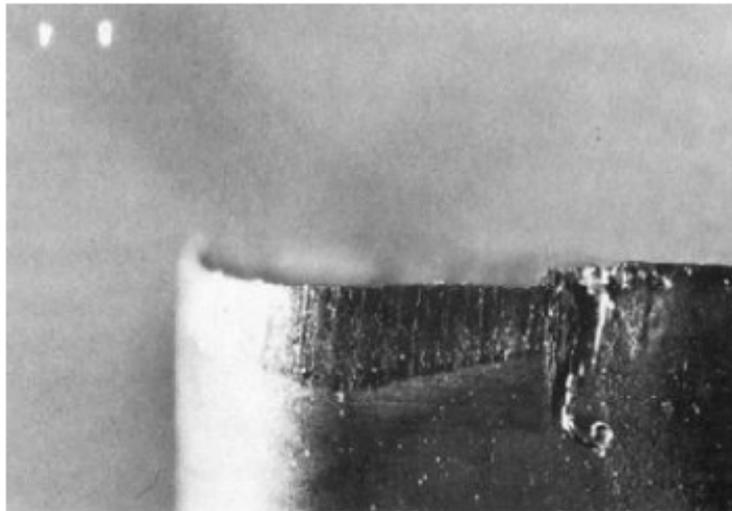


Figura 14: Desgaste de Flanco (Sá, 2010)

O desgaste de cratera (Figura 15) é caracterizado por aparecer na superfície de saída da ferramenta, e sua profundidade e largura estão diretamente relacionadas à velocidade de corte e ao avanço empregados durante o processo de usinagem. Caso o desgaste da cratera entre em expansão, pode ocorrer a quebra da ferramenta (Ferraresi, 1997).

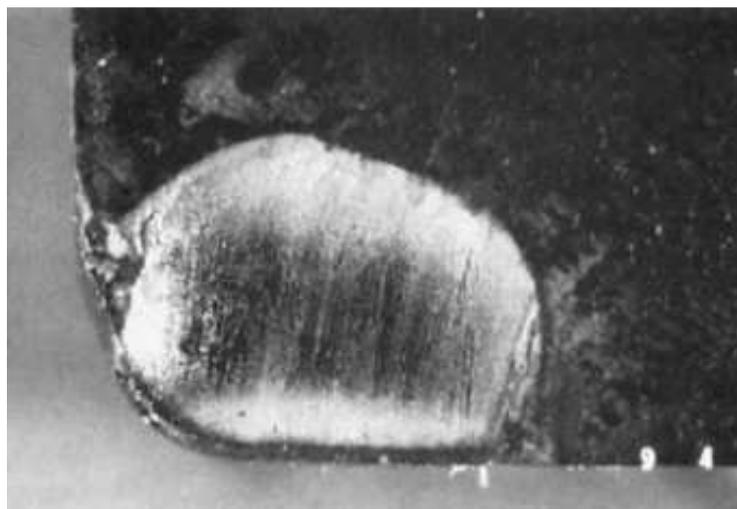


Figura 15: Desgaste de Cratera (Sá, 2010)

O surgimento de trinca também prejudica fortemente a operação, comprometendo tanto a pastilha, quanto a peça usinada, a Figura 16 exemplifica este tipo de desgaste. As trincas possuem forte ligação com a temperatura de usinagem, e se tornam mais prováveis de aparecer, quando a usinagem se dá à velocidades mais elevadas. Este tipo de desgaste pode levar ao lascamento da aresta de corte (Sá, 2010).

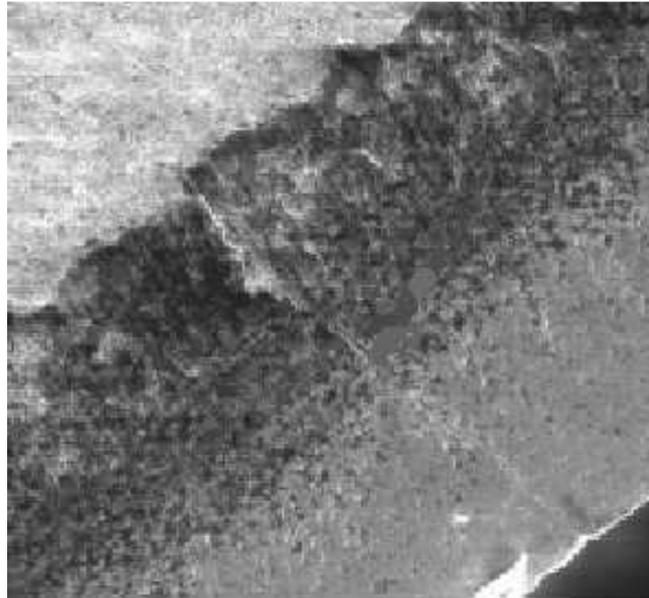


Figura 16: Trinca (Melo, 2000).

2.3.1 Cavaco

O tipo de cavaco gerado durante a usinagem influencia diretamente na intensidade e tipo de desgaste que a ferramenta irá sofrer, o calor gerado e os esforços de corte também são influenciados. O tipo de cavaco formado pode variar com alguns fatores, porém, tem ligação direta com o material da peça usinada. Materiais com alta ductilidade formarão cavacos contínuos e longilíneos, enquanto materiais frágeis formarão cavacos de menor extensão, chamados cavacos de ruptura. Pode ocorrer mudança de cavaco contínuos para cavacos de cisalhamento durante o processo de usinagem, dependendo do tipo e/ou estado da ferramenta e das condições de usinagem e caso haja aumento da deformação do cavaco (Diniz, 1999).

Em se tratando de ângulo de cisalhamento, quanto menor o ângulo de cisalhamento, maior a deformação do cavaco e maiores esforços são exigidos para o corte. Com base no cálculo do coeficiente volumétrico do cavaco (w) pode-se estimar o tipo de cavaco que irá se formar; o cavaco contínuo, apresenta lamelas justapostas e contínuas e pode causar problemas

de vibração e danos aos elementos da máquina-operatriz, sendo comum também que se prenda à peça usinada (Trent & Wright, 2000). Com a diminuição do ângulo de inclinação da ferramenta e da velocidade de corte, ou, com o aumento o avanço, é possível evitar a formação deste tipo de cavaco. Aumentar a profundidade de corte também contribui. O cavaco de ruptura, é constituído de fragmentos arrancados da peça em usinagem, quando o ângulo de saída é reduzido (Amorim, 2002).

A equação 4 rege o coeficiente volumétrico de cavaco (w) e pode ser determinado pela razão entre o volume ocupado pelo cavaco e volume ocupado por essa mesma quantidade de massa do mesmo material (Amorim, 2002).

$$w = \frac{V_{cav}}{V_p} \quad (4)$$

Onde:

V_{cav} = Volume ocupado pelo cavaco (mm^3)

V_p = Volume ocupado por essa mesma quantidade de massa do mesmo material (mm^3)

O formato do cavaco influencia diretamente a vida útil e o acabamento superficial da peça, que podem apresentar diferentes tipos de formato ser classificados a partir desta característica. Na Figura 17 são exemplificados alguns dos formatos de cavaco que podem ser formados durante o processo de usinagem (Besckow, 2016).

1- Cavaco em fita	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco helicoidal tipo arruela	5- Cavaco helicoidal cônico	6- Cavaco em arco	7- Cavaco fragmentado	8- Cavaco tipo agulha
							
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conectado		
							
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			

Figura 17: Formatos de cavaco (Besckow, 2016).

O tipo de formação do cavaco tem ligação direta com acabamento superficial da peça usinada. Cavacos de formação contínua tendem a apresentar melhores acabamentos superficiais, se comparados aos acabamentos das outras formações, porém caso ocorra a formação de emaranhados toda a qualidade superficial pode ser comprometida. O que o cavaco em fitas apresenta os maiores inconvenientes, devendo ser evitado.

2.3.2 Integridade Superficial

A usinagem desenvolve alguns tipos de alterações dimensionais, geométricas e metalúrgicas no material, que determinam a integridade superficial da peça. Essas mudanças são relevantes para o processo, pois a obtenção de uma superfície com fatores superficiais e subsuperficiais adequados garantem o acabamento adequado da peça usinada, agregando confiabilidade, segurança e sobrevida ao componente. A Figura 18 mostra a classificação de acabamento da superfície usinada (Azambuja, 2012).

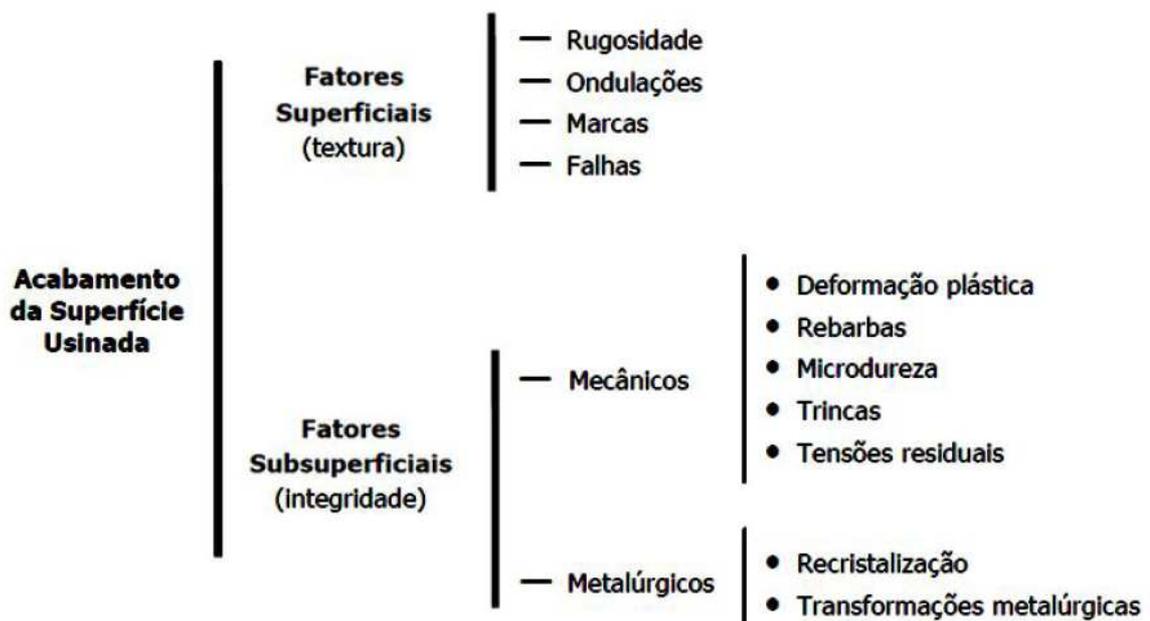


Figura 18: Classificação de acabamento (Jesus, 2013).

Para obtenção de melhor acabamento e integridade superficial, os níveis das variáveis de entrada devem ser escolhidos apropriadamente, o que vai evitar fadiga e desgaste da peça em serviço, geradas por efeitos superficiais. O desempenho das superfícies usinadas sofre influências de transformações químicas e deformações plásticas de camadas externas e

de transformações metalúrgicas e tensões residuais de camadas internas, o que torna o processo minucioso e complexo. Na Figura 19 ficam ilustradas as camadas 1 e 2, onde ocorrem as reações químicas, logo abaixo dessas camadas, aparecem as camadas 3, 4 e 5, onde aparecem deformações plásticas e transformações metalúrgicas, a temperatura de usinagem e a ação de corte da ferramenta (deformação plástica) influenciam muito nesse processo (Jesus, 2013).

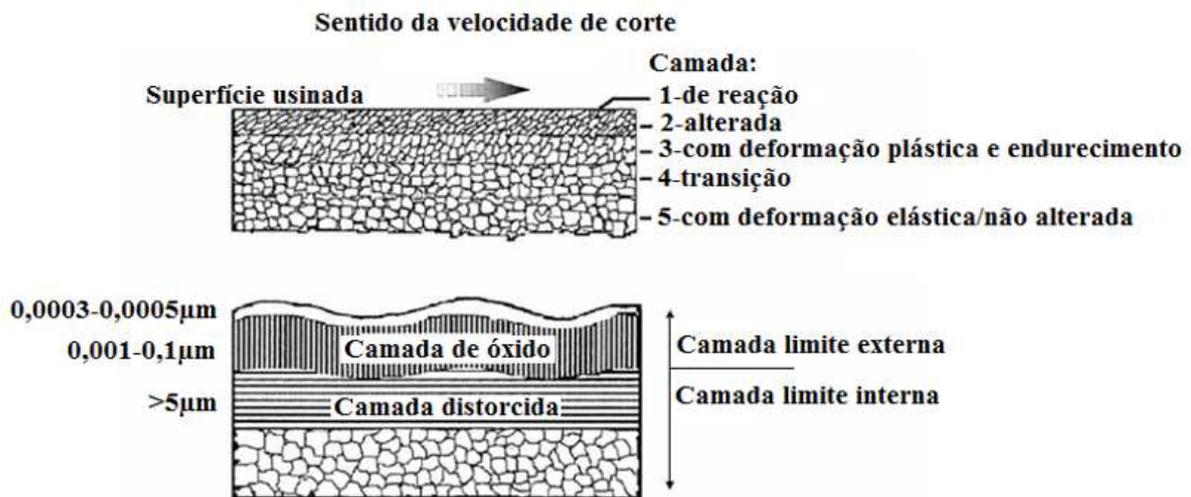


Figura 19: Camadas do material (Jesus, 2013).

A rugosidade, um dos principais fatores superficiais estudados em usinagem, é composta por finas irregularidades ou erros microgeométricos, resultante do processo de corte, marcas e fragmentos existente na ferramenta, rebarba do material, restos de aresta postiça (Azambuja, 2012). Ainda que trabalhadas após o processo de usinagem, as superfícies vão apresentar (microscopicamente) discontinuidades, asperezas, imperfeições e ondulações, este aspecto é denominado rugosidade superficial. A mensuração da qualidade da peça fabricada é dada através de sua medida de rugosidade superficial, aferida através do instrumento conhecido como rugosímetro (Jesus, 2013). Dentre todos os parâmetros de rugosidade, o mais usual é a rugosidade média, que consiste na média aritmética dos valores absolutos do eixo de afastamento, com relação à linha média (Amorim, 2002).

A dureza do material é a propriedade mecânica que permite resistir à deformação plástica (geralmente por penetração). Nos materiais usinados, a dureza é sensível ao encruamento superficial que ocorre no processo. O grau de endurecimento da peça depende das condições de usinagem, o raio do arredondamento da aresta de corte é um forte fator influenciador. Para medição da dureza de determinado material são realizados ensaios de

dureza, que em sua maioria são realizados através de imposição de pressão à superfície da peça utilizando uma ponta de penetração; a marca da penetração e a carga aplicada vão definir a medida da dureza. Os três tipos mais comuns de ensaios de dureza por penetração são: Rockwell, Vickers e Brinell. (Jesus, 2013)

Nos processos de usinagem, o teor das deformações plásticas e transformações metalúrgicas diminui à medida que se distancia da superfície usinada em direção à base da peça. O processo de torneamento a elevadas velocidades de corte impõe altas temperaturas de trabalho, acarretando em transformações microestruturais, sendo assim, a análise da microestrutura ajuda a entender e garantir as propriedades do produto final obtido (Jesus, 2013). Análises microestruturais abordam procedimentos experimentais necessários para a observação e estudo de amostras através da microscopia óptica, o que permite identificar e dimensionar microconstituintes existentes na estrutura do material.

Ao se realizar um estudo experimental variando parâmetros de corte no torneamento do aço inoxidável superduplex ASTM A890, principalmente o avanço (f) e a profundidade de corte (ap), Bordinassi (2006) observou que esses parâmetros afetam a rugosidade Ra. A aplicação de fluido de corte e o tipo de pastilha também foram alterados durante o estudo, conforme Tabela 3.

Tabela 3: Valores de rugosidade obtidos nos ensaios de acabamento com altas velocidades de corte (Bordinassi, 2006).

Teste	v_c [m/mm]	f [mm/v]	ap [mm]	Fluído	Pastilha
1	600	0,1	0,25	Sim	2015
2	600	0,2	0,25	Sim	2015
3	600	0,1	0,5	Sim	2015
4	600	0,2	0,5	Sim	2015
5	600	0,1	0,375	Não	2015
6	600	0,2	0,5	Não	2015
7	600	0,1	0,5	Não	2015
8	600	0,2	0,5	Não	2015
9	600	0,1	0,5	Sim	1025
10	600	0,2	0,25	Sim	1025
11	600	0,1	0,25	Sim	1025
12	600	0,2	0,25	Sim	1025
13	600	0,1	0,25	Não	1025
14	600	0,2	0,375	Não	1025
15	600	0,1	0,5	Não	1025
16	600	0,2	0,5	Não	1025

A Figura 20 indica que o parâmetro mais influenciador na variação da média da rugosidade Ra é o avanço e a interação do avanço com a velocidade de corte. A não utilização de fluido de corte também impactou no aumento de rugosidade e uma maior velocidade de corte propiciou menor valor de rugosidade, o que se deve, principalmente, à diminuição da formação de aresta postiça.

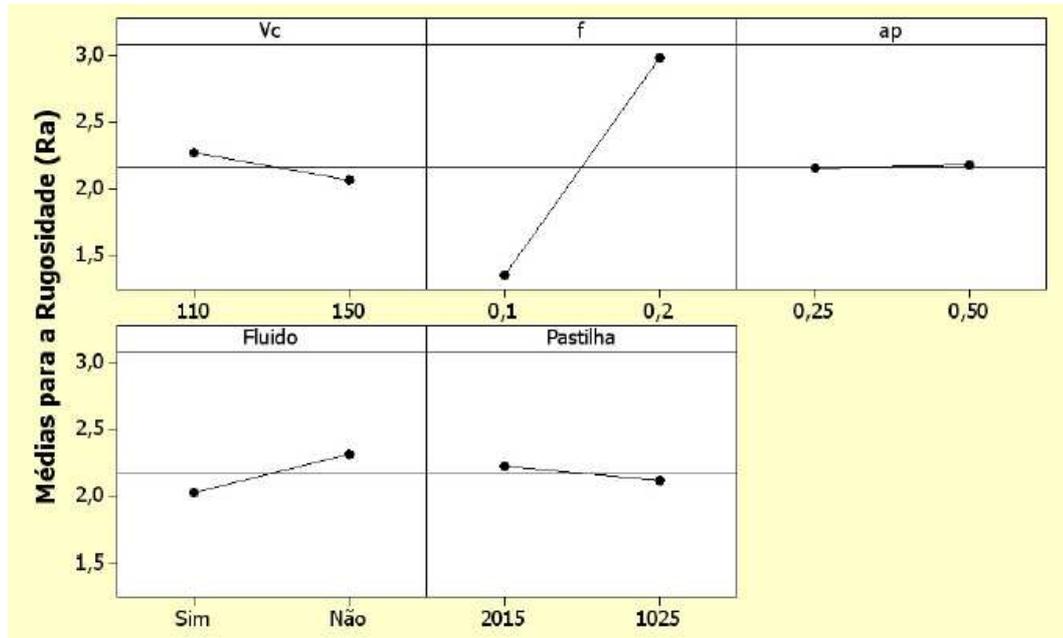


Figura 20: Efeitos das médias dos parâmetros sobre a rugosidade para operações de acabamento (Bordinassi, 2006).

CAPÍTULO 3

Materiais e Métodos

Neste capítulo são descritos todos os procedimentos experimentais e materiais utilizados na realização desse trabalho. As etapas consistiram no torneamento das amostras e análise do desgaste da ferramenta de corte em diferentes tempos de usinagem. Complementarmente foi realizada uma análise microestrutural de algumas amostras para verificar se houve deformação plástica e/ou mudança microestrutural do material usinado.

3.1 – Aço inoxidável duplex S31803

Para este trabalho foi utilizado aço inoxidável duplex S31803 em barra laminada de 3/4” de diâmetro e 3 metros de comprimento. A dureza do material como recebido era de 250 HV0,2, medida experimentalmente. As Tabelas 4 e 5 apresentam a composição química e as propriedades mecânicas deste aço de acordo com a norma A240/A240M, respectivamente.

Tabela 4: Composição química do aço inoxidável duplex UNS S31803 (% de peso) (A240/A240M, 2004).

C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Mo	N
0,03	2,0	1,0	21,0 - 23,0	4,5 - 6,5	0,03	0,02	2,5 - 3,5	0,08 - 0,2

Tabela 5: Propriedades mecânicas do aço inoxidável duplex UNS S31803 (ASTM E8/E8M, 2011 modificado).

Limite de Resistência (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento (%)
840	620	30

3.2 – Preparação das Amostras

Para a realização dos torneamentos foram confeccionadas duas barras de 200 mm cada uma e foram realizados sangramentos de 3 mm de largura, totalizando 8 amostras em cada barra, conforme Figura 21. Neste trabalho foram utilizadas 12 amostras de 20 mm (8 amostras

na primeira barra e 4 amostras na segunda).

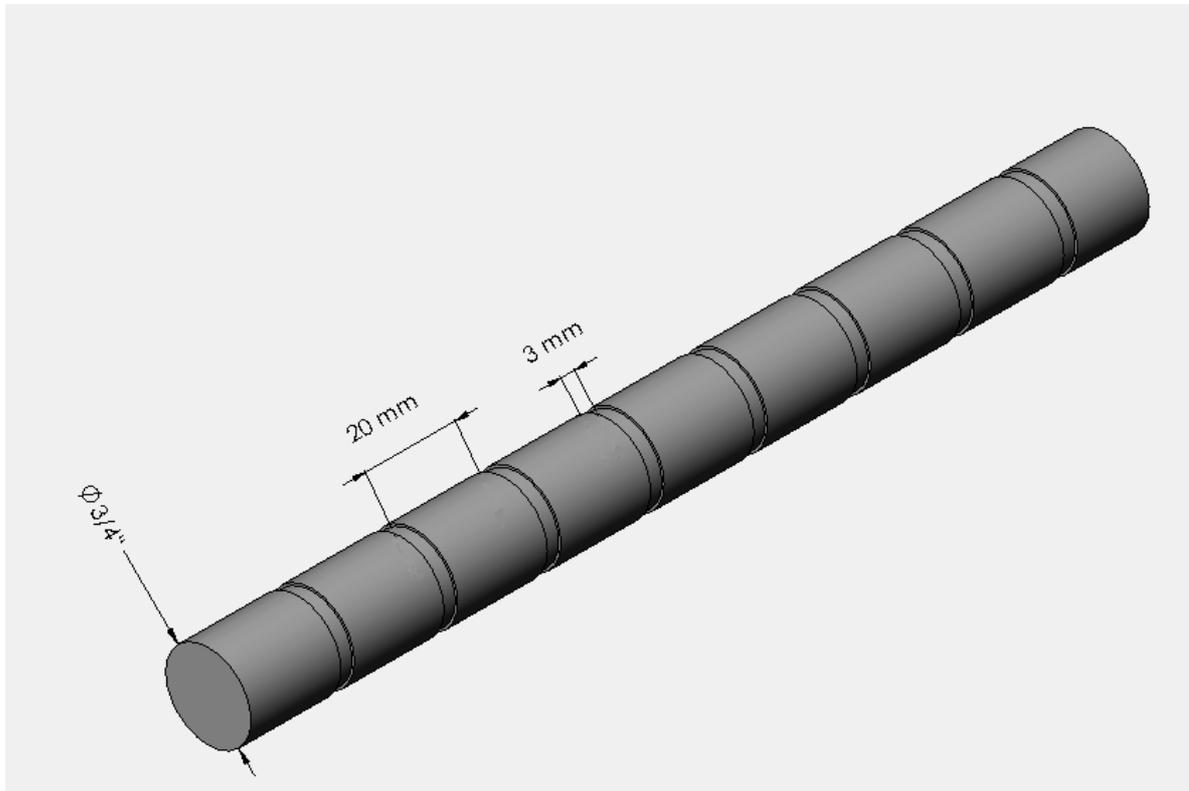


Figura 21: Representação das dimensões das amostras.

Para posterior estudo da microestrutura pós usinagem foram preparadas 2 seções de amostras usinadas em diferentes condições. Foi realizado o corte dessas seções, que posteriormente foram embutidas em baquelite no Laboratório de Materiais (LAMAT). As seções de amostra embutidas foram lixadas em ordem decrescente de granulometria com lixas de #100, #220, #320, #400, #500 e #600 na politriz. Posteriormente foi realizado o polimento com pasta diamantada na seguinte ordem: 6 μm , 3 μm e 1 μm . Para o ataque químico, foi utilizado hidróxido de potássio (KOH), 10% eletrolítico, 5 V, onde as amostras ficaram imersas por 2 minutos. Terminadas as etapas de preparação as amostras foram analisadas em óptica através do Microscópio Ótico Olympus BX60M do LAMAT.

3.3 – Torneamento

As barras metálicas foram usinadas à seco em torno mecânico Nardini modelo Mascote MS205, no Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LABUS) do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ. Para este trabalho foram

definidas 6 velocidades de corte, apresentadas na Tabela 6. Todas as operações foram feitas a seco.

Tabela 6: Velocidades de corte utilizadas na usinagem das amostras.

Velocidades de corte						
Condição	1	2	3	4	5	6
Velocidade de Corte - V_c (m/min)	30	50	60	75	100	150

A análises foram baseadas no comprimento de corte, cada velocidade de corte possuía duas respectivas amostras, totalizando 40 mm de material. Foram realizados 12 passes de torneamento, onde as imagens e as análises foram realizadas a cada intervalo de 4 passes, sendo assim, os comprimentos de corte estudados foram: 160 mm, 320 mm e 480 mm.

3.4 – Ferramenta de corte

Na usinagem das amostras foi utilizado porta ferramenta modelo Screw-on SCSP 45° e pastilhas de metal duro DCMT11T304-LFKC5010 com revestimento CVD de $Ti(C,N)+Al_2O_3+TiN$ da marca Kennametal, conforme Figura 22. Foram utilizadas 3 pastilhas idênticas, onde cada gume usinou 2 amostras de 20 mm cada, ambas com a mesma velocidade de corte. A tabela 7 descreve as especificações da pastilha.

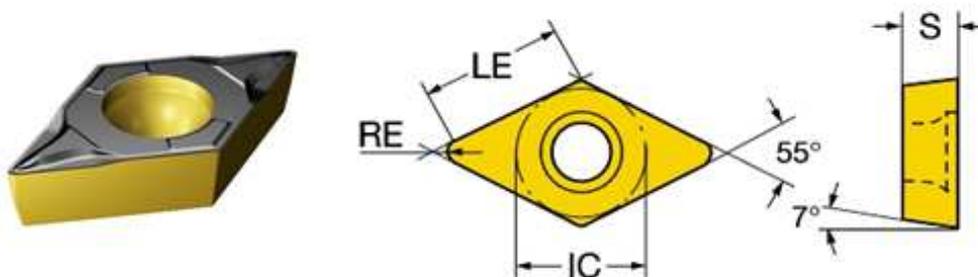


Figura 22: Pastilhas utilizadas na usinagem das amostras (Sandvik Coromant, 2017)

Tabela 7: Parâmetros da pastilha.

Espessura da Pastilha (S)	3,97 mm
Tipo de Operação	Acabamento
Diâmetro do Círculo Inscrito (IC)	9,525 mm
Raio de Ponta (RE)	0,4 mm
Comprimento Efetivo da Aresta de Corte (LE)	11,63 mm

As características da ferramenta e a classe do material usinado definem as velocidades de corte ideais entre 135 e 225 m/min (para aços inoxidáveis), o que infere um valor de 185 m/min para o ponto ótimo da curva da velocidade. O avanço e a profundidade de corte indicados pelo fabricante para aços inoxidáveis é de 0,05 a 0,2 mm/rot e 0,16 a 1,6 mm, respectivamente, sendo adotados os valores de 0,094mm/rot e 0,3mm.

3.5 – Análise de desgaste

A análise de desgaste das ferramentas de corte foi realizada através da captura de imagens através de microscopia ótica. Nas imagens foi observado, em diferentes tempos de usinagem, a progressão dos desgastes sob diferentes velocidades de corte. No último tempo de usinagem avaliado foram recolhidos dados sobre o desgaste de flanco acumulado na ponta das ferramentas e gerado um gráfico comparativo entre os valores observados para cada velocidade aplicada.

Para a análise da camada atingida na usinagem do aço inoxidável foram estudadas duas condições: 2 (denominada de amostra A) e 6 (amostra B). Foram capturadas imagens com aumento de 50x e 100x (para ambas as amostras) através do microscópio ótico.

CAPÍTULO 4

Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados resultados obtidos a partir dos processos de usinagem e parâmetros descritos no capítulo anterior. De acordo com embasamento teórico da literatura utilizada, será possível respaldar a discussão e fundamentar as análises.

4.1 – Desgaste das ferramentas de corte

Afim de detalhar os tipos de desgastes e a agressividade dos mesmos foram analisadas duas superfícies de cada ferramenta: a superfície principal e a superfície de saída do cavaco. As Figuras 23 à 25 são referentes as superfícies superior, onde é possível observar o desgaste da ferramenta de corte em 3 condições de corte distintas, relacionando o nível de desgaste com o comprimento usinado (L_c) por cada gume.

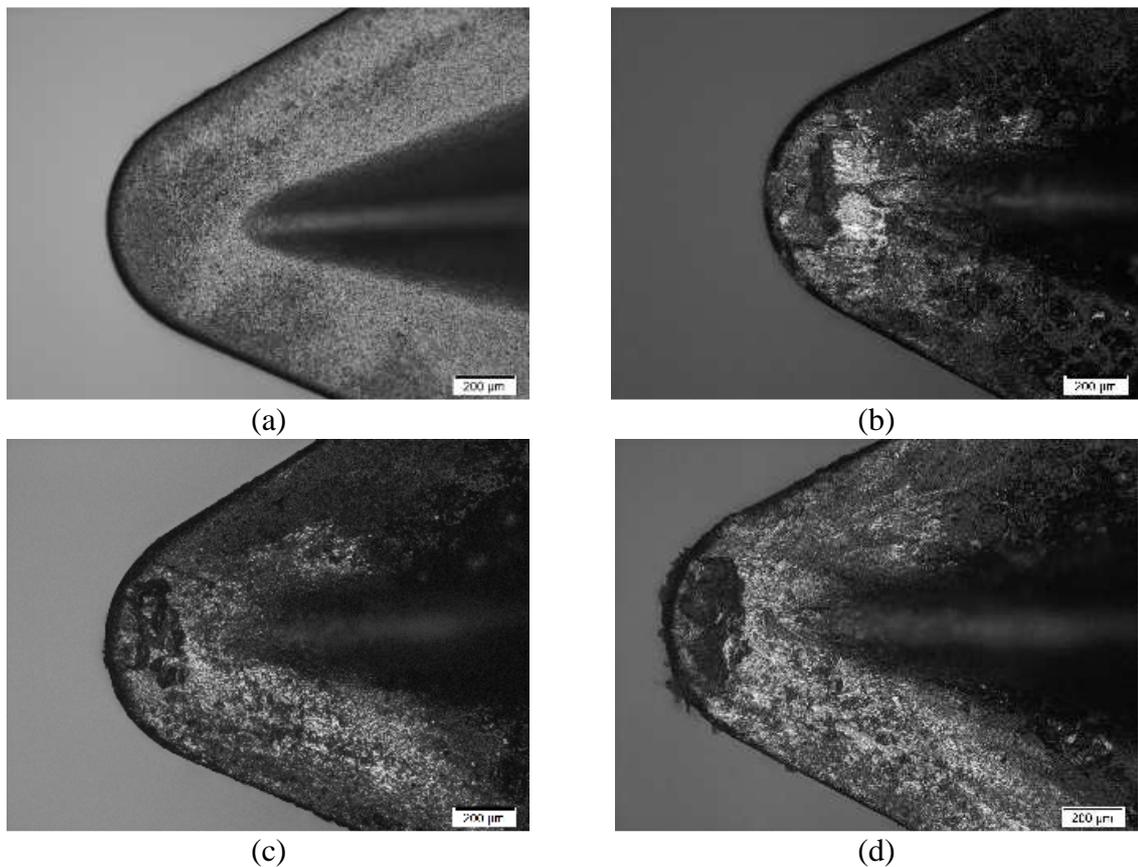


Figura 23: Superfície superior da pastilha utilizada na condição 1 ($V_c = 30$ m/min): (a) nova, (b) $L_c = 160$ mm, (c) $L_c = 320$ mm, (d) $L_c = 480$ mm.

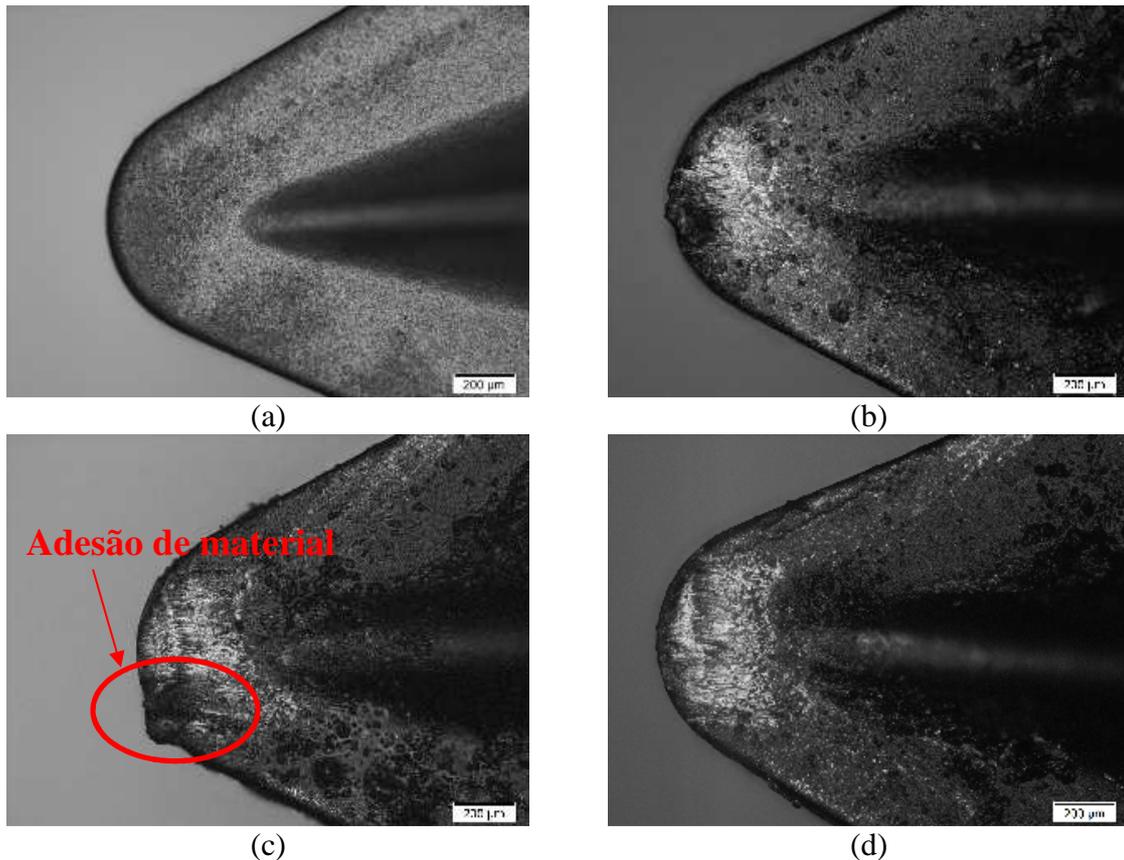


Figura 24: Superfície superior da pastilha utilizada na condição 3 ($V_c = 60$ m/min): (a) nova, (b) $L_c = 160$ mm, (c) $L_c = 320$ mm, (d) $L_c = 480$ mm.

Analisando as Figuras 23 à 25 é possível observar que para velocidades de corte mais baixas fica mais evidente o desgaste da ferramenta (regiões mais brilhantes) e, em alguns instantes foram observadas adesões grosseiras (Figura 24c), que podem resultar na formação da aresta postiça de corte. A formação de aresta postiça prejudica muito a qualidade superficial das peças usinadas e acelera o processo de desgaste da ferramenta de corte pois tende a eliminar com maior facilidade o revestimento da pastilha, prejudicando sua resistência ao desgaste abrasivo. Na condição 1, com menor valor de velocidade de corte fica evidenciado o desgaste de cratera (Figura 23d), característico do atrito do cavaco com a superfície de saída, que indica o final da vida da ferramenta pois a formação do desgaste de cratera fragiliza a ponta da ferramenta de corte, podendo resultar em um lascamento. Para a velocidade de 100m/min nota-se a tendência à formação de cratera, mas não foi observado um desgaste agressivo que pudesse impedir que a ferramenta continuasse a ser utilizada.

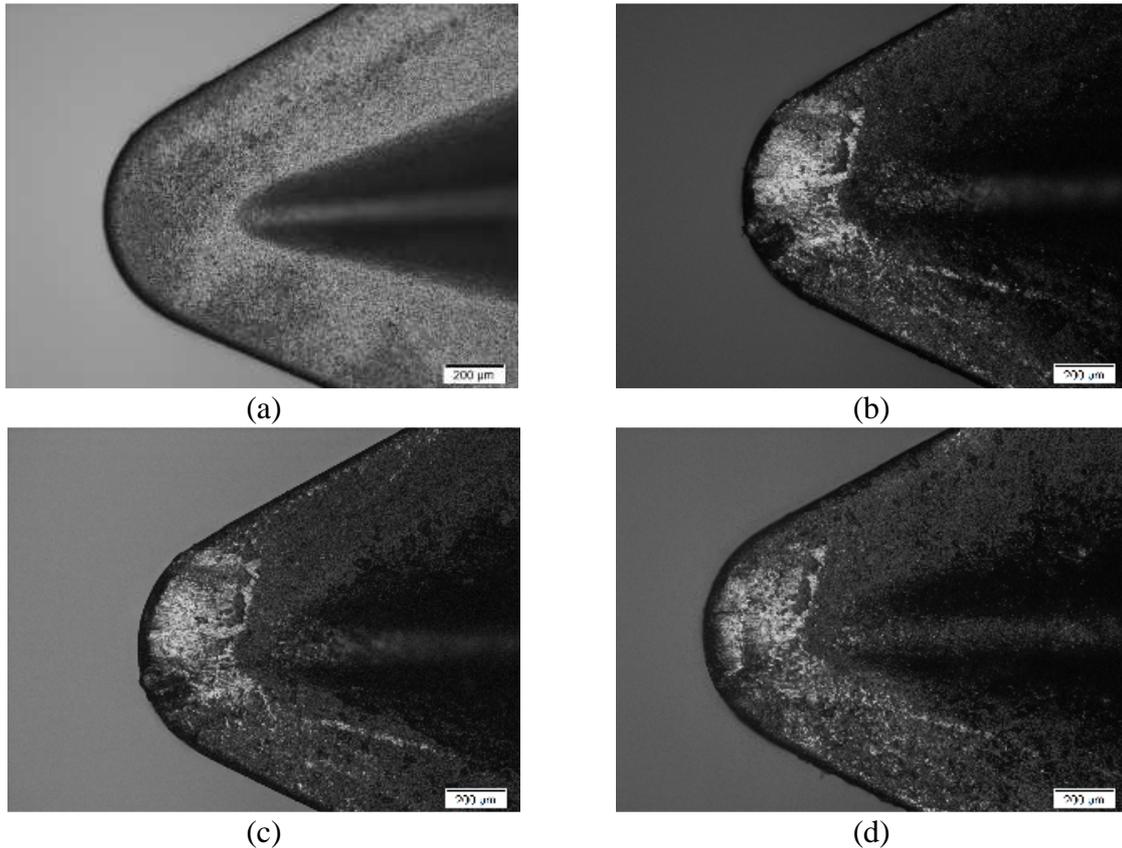


Figura 25: Superfície superior da pastilha utilizada na condição 5 ($V_c = 100$ m/min): (a) nova, (b) $L_c = 160$ mm, (c) $L_c = 320$ mm, (d) $L_c = 480$ mm.

Com relação as superfícies principais, as Figuras 26 à 28 apresentam imagens das mesmas ferramenta analisadas nas superfícies de saída. Neste caso a condição de corte com velocidade de 60m/min apresentou um lascamento prematuro da ferramenta, que indica que essa condição de corte é muito severa para a vida da ferramenta. Ao término dos primeiros 160 mm usinados com a pastilha, pode ser observada adesão de material à ferramenta de corte, causado por solda por pressão do cavaco a pastilha; esse tipo de desgaste é agravado à condições de corte mais baixas, sendo mais comum na usinagem de aços inoxidáveis. O processo de deformação plástica é identificado nas condições de velocidade mais elevadas (Figuras 28c e 28d), onde há reentrância de material em alguns pontos da ferramenta, principalmente no gume cortante. Com base nas imagens analisadas fica claro que a análise do desgaste de ferramenta deve ser realizado nas principais superfícies tendo em vista que diferentes condições de corte podem resultar em diferentes mecanismos de desgastes, em diferentes regiões da ferramentas.

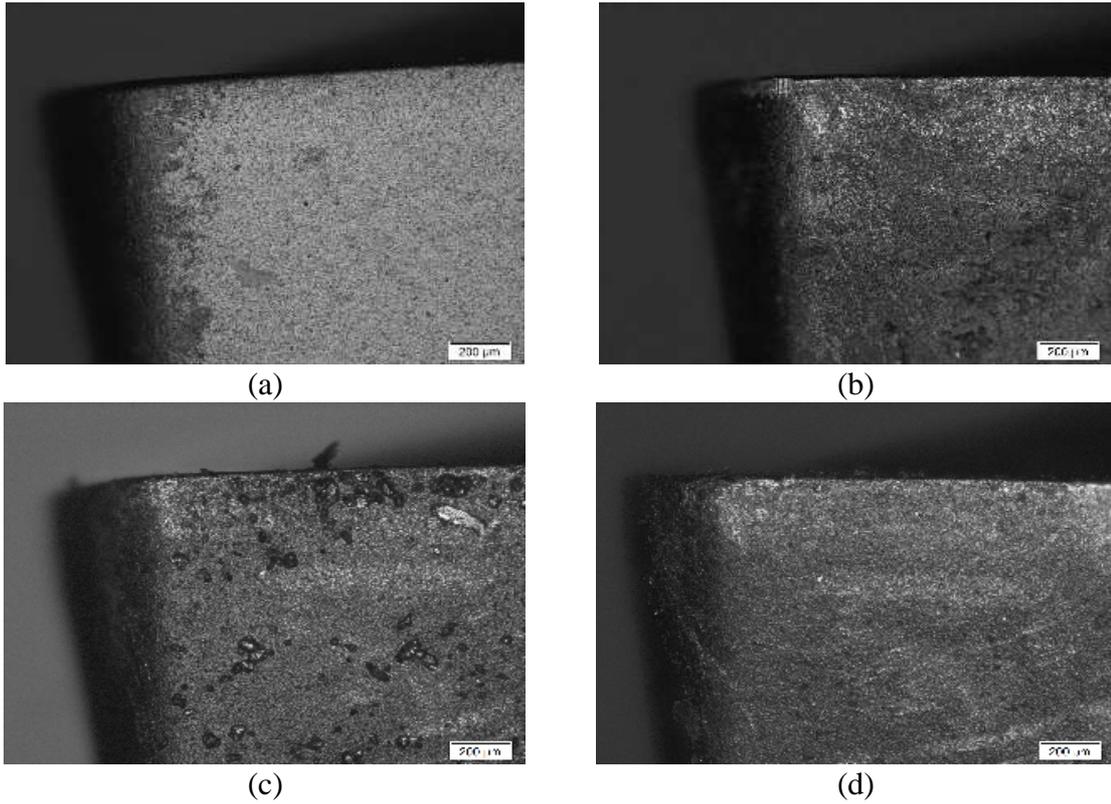


Figura 26: Superfície de saída da pastilha utilizada na condição 1 ($V_c = 30$ m/min):

(a) nova; (b) $L_c = 160$ mm; (c) $L_c = 320$ mm; (d) $L_c = 480$ mm.

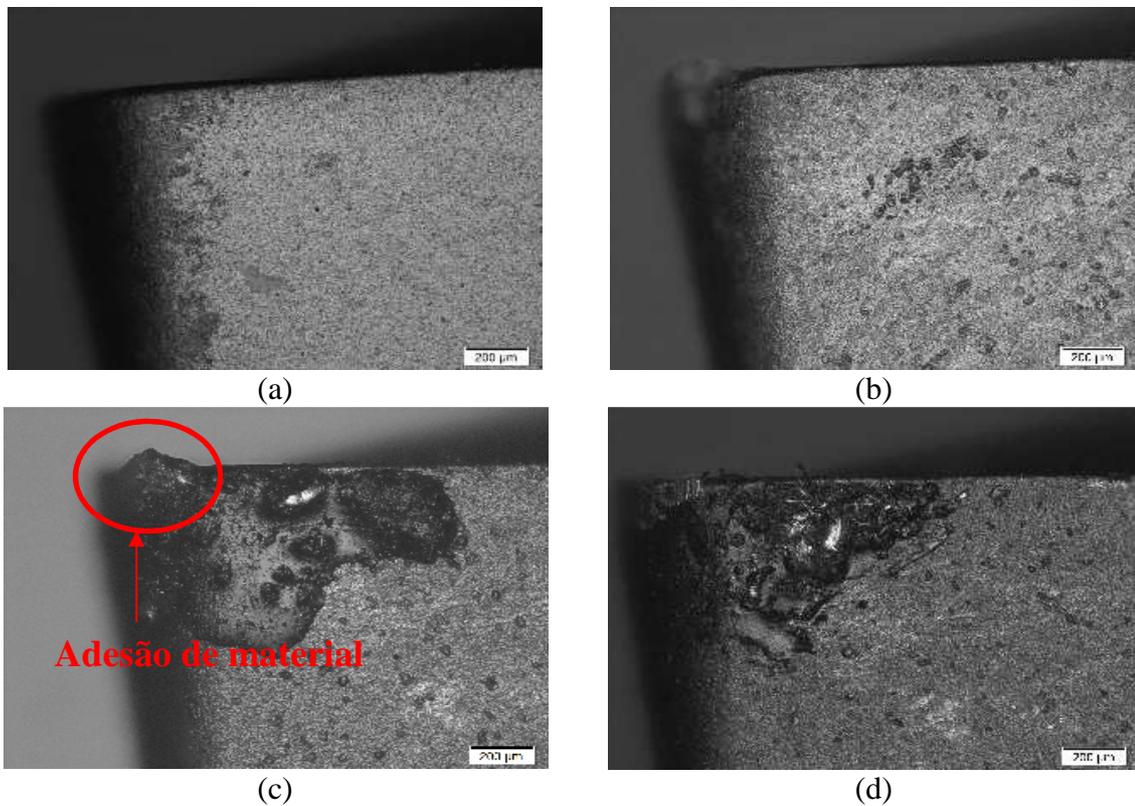


Figura 27: Superfície de saída da pastilha utilizada na condição 3 ($V_c = 60$ m/min):

(a) nova; (b) $L_c = 160$ mm; (c) $L_c = 320$ mm; (d) $L_c = 480$ mm.

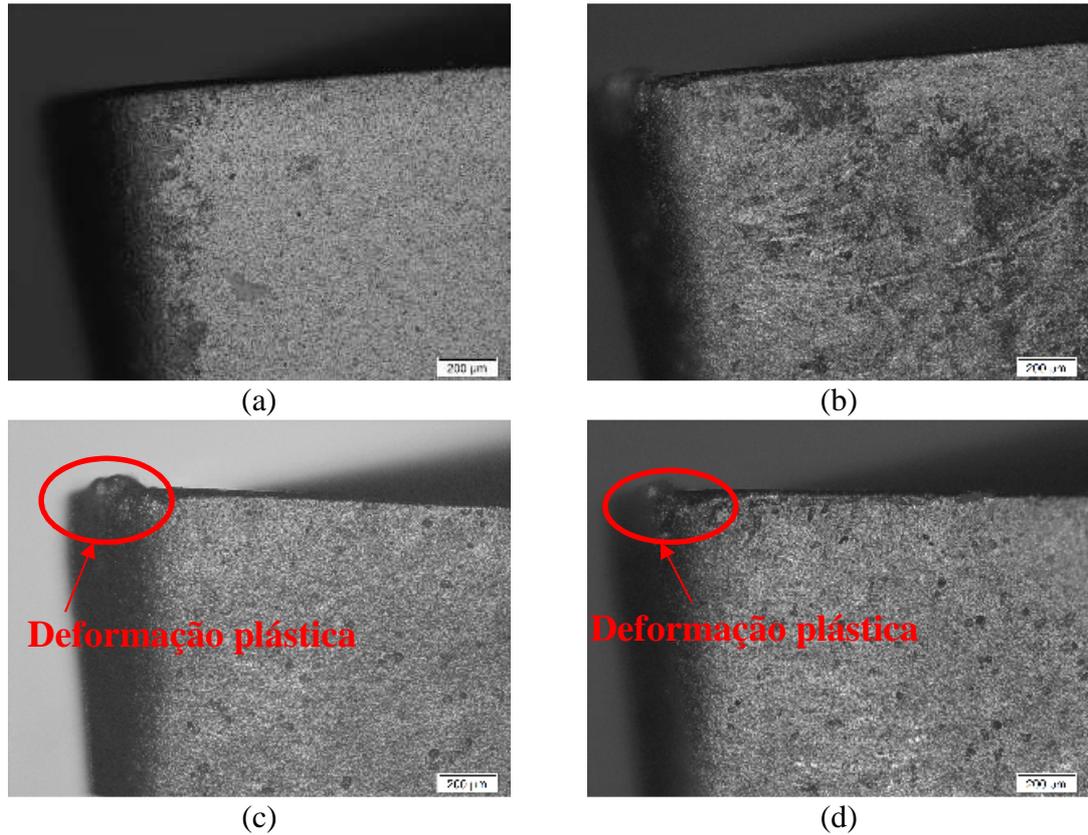


Figura 28: Superfície de saída da pastilha utilizada na condição 5 ($V_c = 100$ m/min):
 (a) nova; (b) $L_c = 160$ mm; (c) $L_c = 320$ mm; (d) $L_c = 480$ mm.

Outros tipos de desgaste foram identificados, utilizando velocidade de 75 m/min foi identificado o aparecimento de trinca na pastilha (Figura 29), o que pode comprometer fortemente a vida útil da ferramenta. O surgimento de trinca está relacionado diretamente à tenacidade do material. Além da trinca, ocorreu desgaste de flanco bastante evidente. O desgaste de flanco também foi aparente nos parâmetros de 30 m/min, 50 m/min e 60 m/min (Figuras 30 à 32).

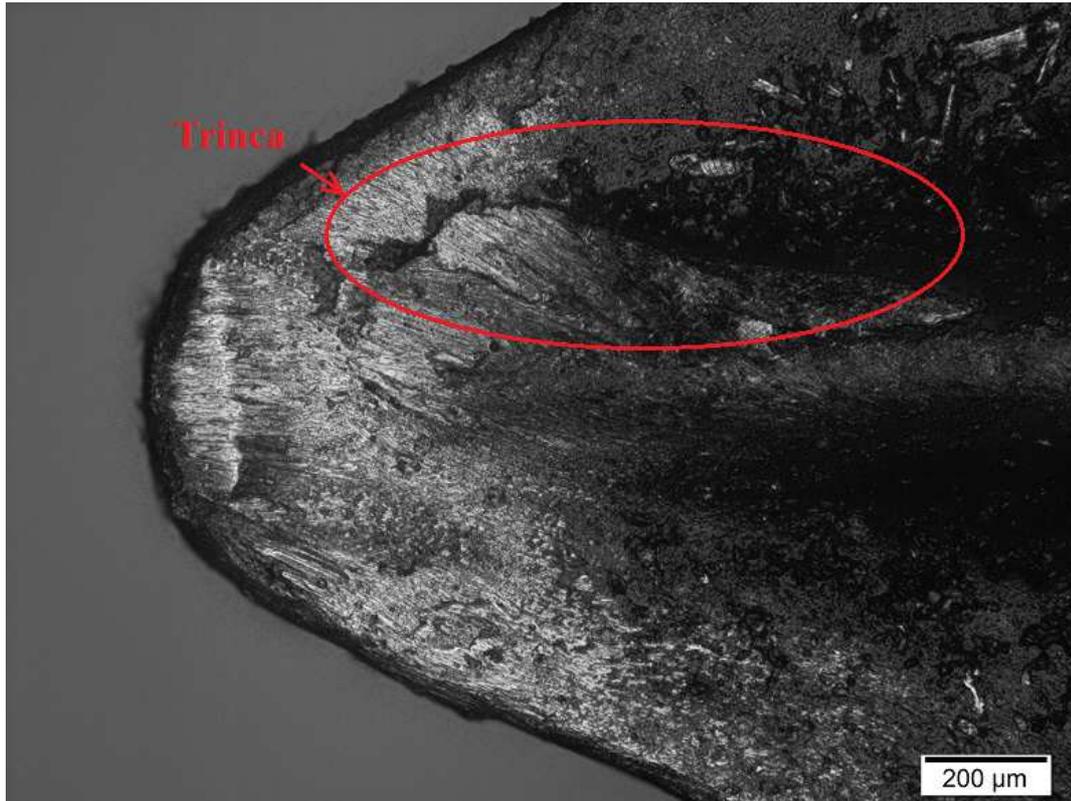


Figura 29: Trinca após 480 mm usinados à velocidade de 75 m/min.



Figura 30: Desgaste de flanco após 480 mm usinados à velocidade de 30 m/min.

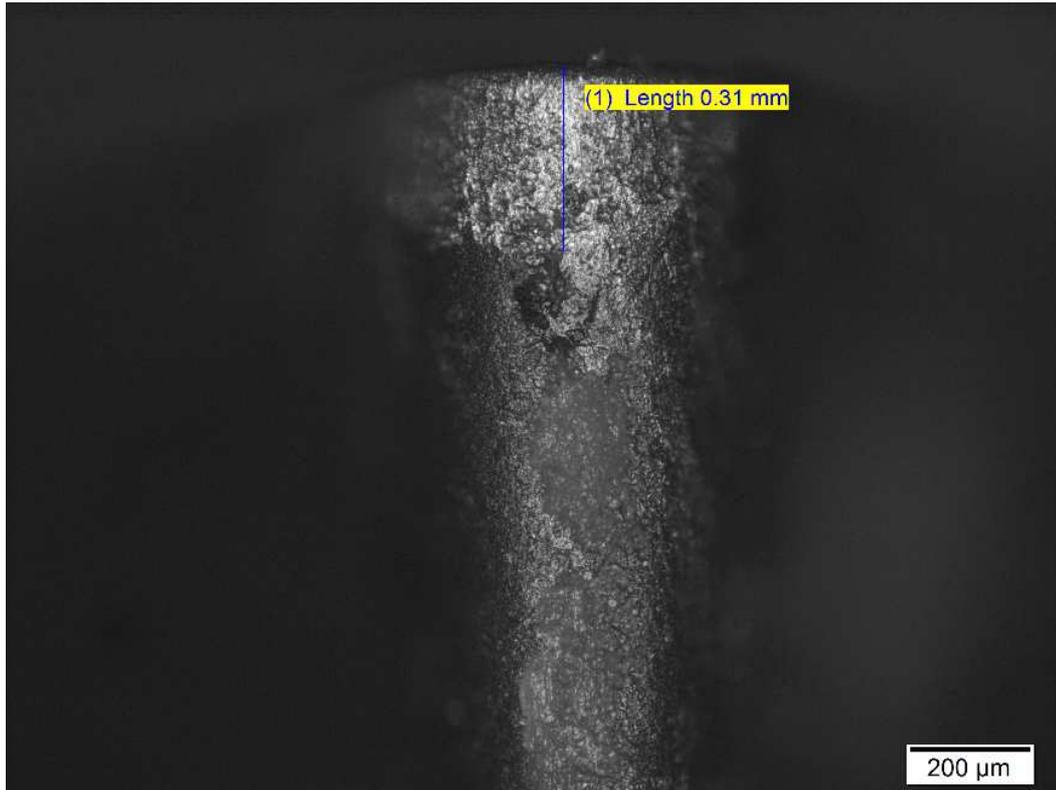


Figura 31: Desgaste de flanco cotado após 480 mm usinados à velocidade de 50 m/min.

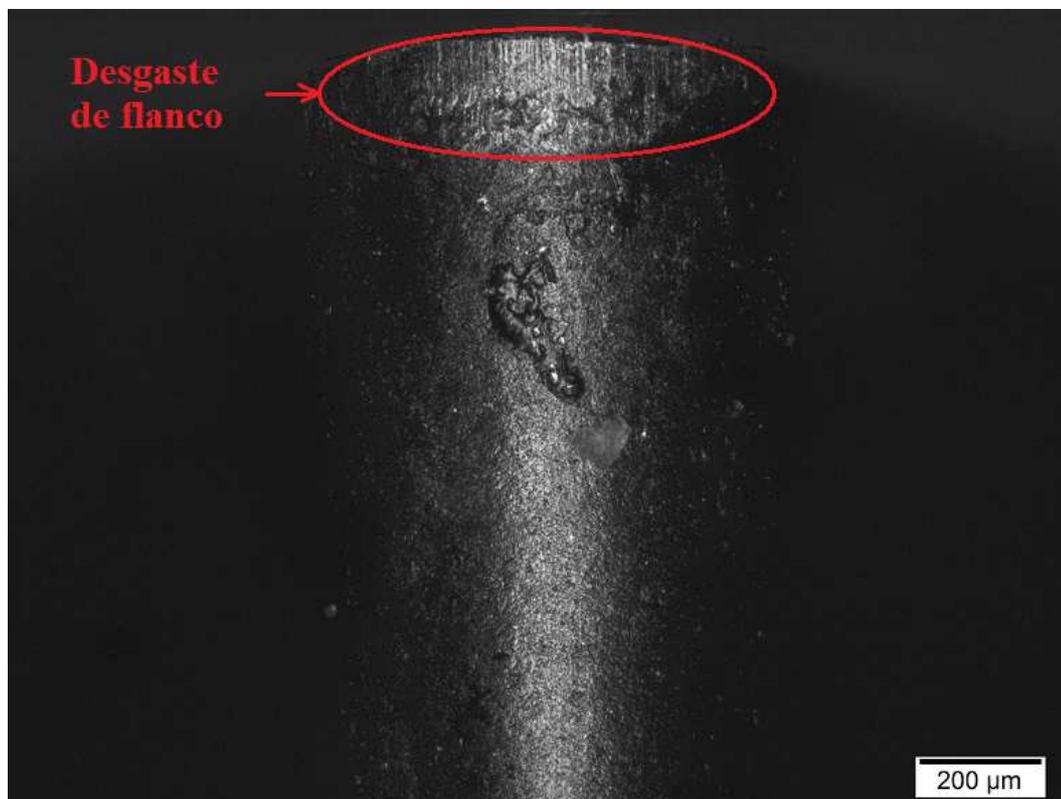


Figura 32: Desgaste de flanco após 480 mm usinados à velocidade de 60 m/min.

Todas as condições analisadas apresentam desgaste de flanco em algum nível. O desgaste de flanco modifica a geometria da ferramenta, o que prejudica diretamente o acabamento superficial da peça usinada, gerando não conformidades ou até mesmo impossibilidade de uso da peça. Foram analisadas as dimensões (sentido vertical) de desgaste de flanco em cada uma das seis condições (Figura 33), e as condições para valores de velocidade de corte intermediários apresentaram os menores desgastes, enquanto os maiores desgastes ficaram concentrados nos demais valores. O maior desgaste de flanco foi oriundo da condição 6 ($V_c = 150$ m/min) sendo esta a que apresenta maior valor de velocidade de corte. Entretanto, para essa condição não foi observado nenhum outro tipo de desgaste, o que indica que essa velocidade é a que apresenta comportamento mais homogêneo no desgaste, considerando que o desgaste de flanco é um tipo de desgaste muito comum nas faixas de velocidade para usinagem convencional (condição de usinagem estudada neste trabalho).

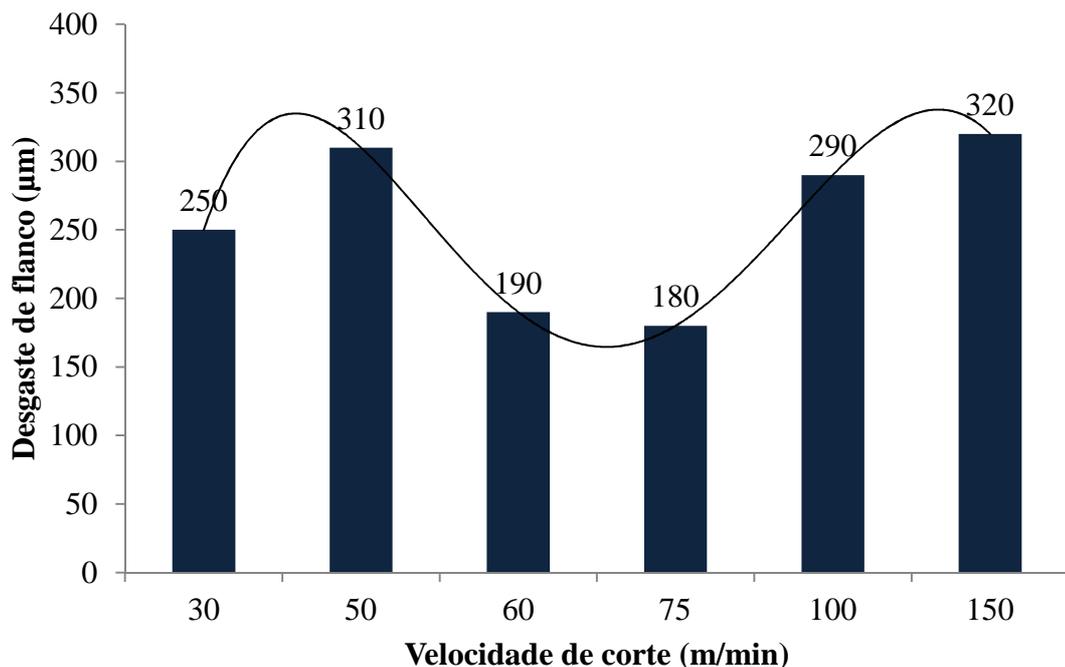


Figura 33: Velocidade de corte (m/min) x Desgaste de flanco (µm)

As condições 2 (amostra A) e 6 (amostra B) foram analisadas quanto à camada atingida durante o processo de usinagem. Na Figura 34 são apresentadas as microscopias óticas capturadas com aumento de 100x para cada condição.

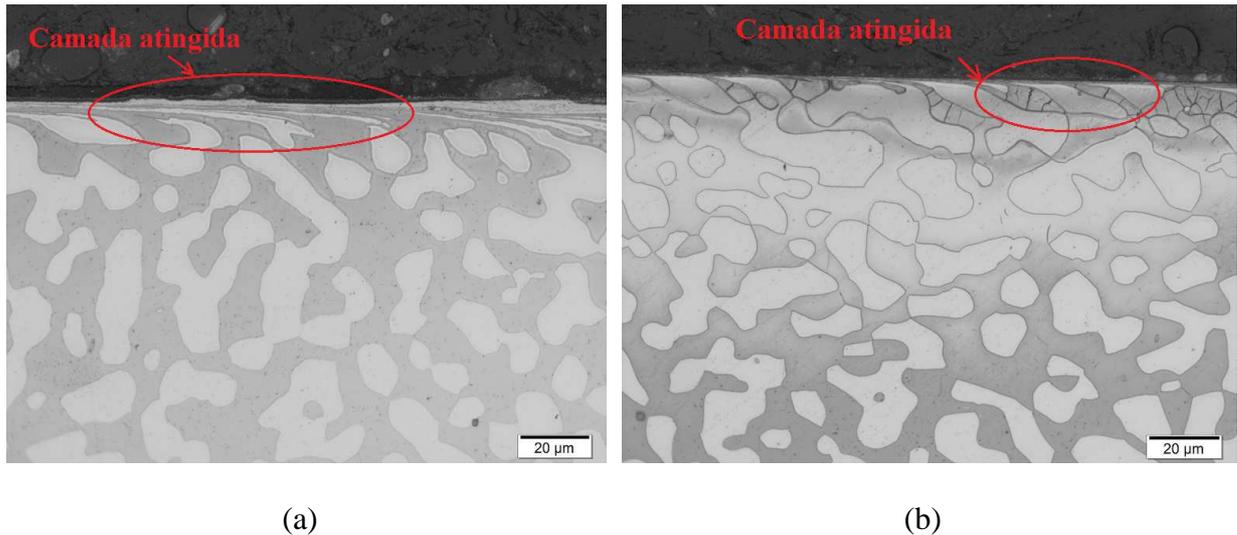


Figura 34: Camada atingida: (a) condição 2 ($Vc = 50$ m/min) e (b) condição 6 ($Vc = 150$ m/min)

A amostra A, de $Vc = 50$ m/min, apresenta grãos alongados na região de entorno da seção, ou seja, na região que teve maior tempo de contato com a ferramenta de corte e, conseqüentemente, possui uma camada deformada mais profunda. Por outro lado, a amostra B, de $Vc = 150$ m/min, não apresenta esta mesma característica. Logo, velocidades maiores propiciaram deformações plásticas menores. Os tempos de corte para cada uma das condições foram calculados (0,426 min, 0,266 min, 0,213 min, 0,170 min, 0,133 min, 0,085 min ordenados da menor para a maior condição de corte), a partir desses dados foi observado que quanto maiores as velocidades de corte, menores os tempos de corte, ou seja, velocidades maiores fazem com que os tempos para usinar a peça sejam menores.

A análise microestrutural dos cavacos formados foi realizada após 480 mm de comprimento de corte. Foi observado que, para todas as seis condições houve formação de cavaco helicoidal do tipo longo e contínuo, diferenciando-se apenas na dimensão da “abertura” do helicóide. Na Figura 35 as imagens capturadas via microscópio.

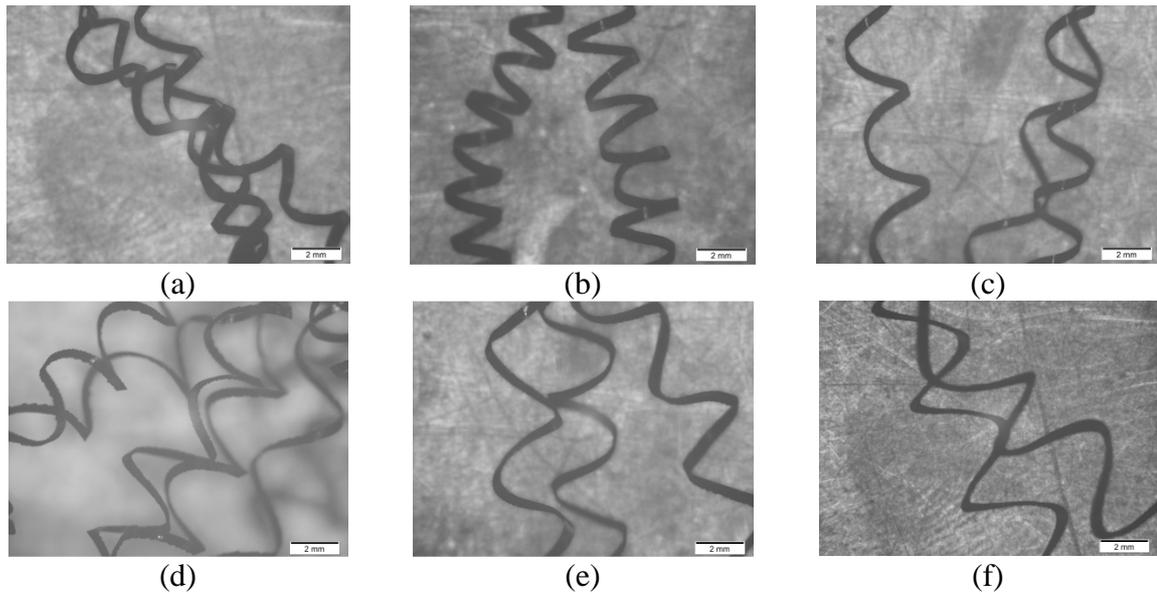


Figura 35: Microestrutura dos cavacos analisados após 480 mm usinados, nas seguintes condições: (a) 30 m/min, (b) 50 m/min, (c) 60 m/min, (d) 75 m/min, (e) 100 m/min, (f) 150 m/min.

A formação de cavaco helicoidal indica remoção elevada de material a partir da superfície da peça usinada e, em geral, é considerada uma geometria conveniente. O formato contínuo pode emaranhar-se na peça e na ferramenta de corte, gerando mais danos à ferramenta de corte e comprometendo o acabamento superficial. Além disso, apresenta alto coeficiente volumétrico, o que também contribui para dificultar sua remoção. O cavaco contínuo também pode ser nocivo para a segurança do operador de usinagem.

CAPÍTULO 5

Conclusão

A partir do embasamento fornecido pela literatura de referência, nos parâmetros de processo e nas análises realizadas neste trabalho, pode-se concluir que:

1. A velocidade de corte influencia diretamente no mecanismo de desgaste da ferramenta de corte.
2. Dentro das condições analisadas, velocidades de corte com valores intermediários (60 e 75 m/min) apresentaram menor região afetada por aparecimento de desgaste de flanco, sendo à estas atribuídos os pontos ótimos de usinagem para este fator. O maior desgaste de flanco observado deu-se ao maior valor de velocidade de corte. Entretanto, este mecanismo de desgaste esteve presente em todas as análises realizadas para as seis condições.
3. Em se tratando de desgaste da ferramenta de corte, condições de usinagem à velocidades mais baixas apresentaram mais frequentemente adesão de material à superfície da ferramenta, sendo este tipo de mecanismo de desgaste mais comumente observado em aços inoxidáveis. Condições de velocidade mais elevadas propiciaram o aparecimento de deformação plástica, predominantemente.
4. Mesmo sendo condições ótimas em relação ao desgaste de flanco, as velocidades intermediárias de corte apresentaram desgaste que podem culminar no colapso da ferramenta durante as operações de usinagem de forma imprevisível, como trincas.
5. Dados os parâmetros constantes, foram analisados os cavacos formados em cada uma das seis condições, e todos apresentaram geometria helicoidal contínua, havendo diferença apenas na menor ou maior “abertura” dos helicoides formados, que podem ser prejudiciais para o acabamento das peças usinadas.

CAPÍTULO 6

Sugestões para trabalhos futuros

1. Verificar as forças de corte geradas pelo processo de torneamento com as condições deste projeto.
2. Estudar a influência da velocidade de corte na deformação dos grãos das camadas subsuperficiais atingidas pela usinagem do material em todas as condições.
3. Analisar os efeitos térmicos na integridade superficial da peça e da ferramenta de corte quando o torneamento for realizado com a presença de fluido de corte.
4. Verificar a influência das diferentes condições de velocidade na rugosidade das amostras.
5. Relacionar a variação da condição de avanço no desgaste da ferramenta.
6. Estudar a influência da geometria da ferramenta de corte nos mecanismos de desgaste.
7. Realizar estudo sobre o efeito microestrutural, através de corte transversal da barra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, H.J.; *Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste da ferramenta, rugosidade e de forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, 2002.

ASTM A240/A240M, *Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications*, Pensilvânia, Estados Unidos da América, 2004.

ASTM E8/E8M, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, Pensilvânia, Estados Unidos da América, 2011.

AZAMBUJA, A.S; *Análise Comparativa da Vida das Ferramentas de Corte Alisadora (Wiper) e o Convencional (Standard) no Torneamento de Acabamento do Aço SAE 4140*, Monografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2012.

BESCKOW, A.B; *Processos de Usinagem I*, URI, Rio Grande do Sul, Brasil. Disponível em: <https://plant3d.files.wordpress.com/2011/04/processos_de_usinagem_i_-_aula_04_-_formac3a7c3a3o_de_cavacos.pdf>. Acesso em: 26 set. 2017.

BORDINASSI, C. E., *Contribuição ao Estudo da Integridade Superficial de um aço inoxidável superduplex após usinagem*, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, Brasil, 2006.

BORK, C. S.; *Otimização de variáveis de processo para a furação do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541*. 1995.127 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 1995.

CHIAVERINI, V.; *Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento*, vol. 2, 2ª ed., São Paulo, Brasil, Editora McGraw-Hill, 1986.

CHIAVERINI, V; *Aços e Ferros Fundidos*, 1ª ed, São Paulo, Brasil, Editora ABM, 1977.

COLPAERT, H.; *Metalografia do Produtos Siderúrgicos Comuns*, 4ª ed, São Paulo, Blucher, 2008.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L.; *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*, São Paulo, Brasil, MM Editora, 1999.

FERRARESI, D.; *Fundamento da Usinagem dos Metais*, São Paulo, Brasil, Editora Edgard Blücher, 1970.

GROOVER, M.; *Introdução aos Processos de Fabricação*, 1ª ed., Rio de Janeiro, LTC, 2014.

JESUS, R.C; *Avaliação dos Esforços, Temperatura e Integridade Superficial em Torneamento do Aço Inoxidável Super Duplex UNS S32760 Quando Alterado o Ângulo de Posição da Ferramenta e os Parâmetros de Corte*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São João del-Rei, Minas Gerais, Brasil, 2013.

LEANDRO, R. M.; *Influência do Tempo e da Temperatura de Solubilização no Tamanho de Grão Austenítico e Ferrítico, e na Fração de Ferrita de um Aço Inoxidável Duplex UNS S31803*, Monografia, Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros (FEI), São Bernardo do Campo, São Paulo, Brasil, 2013.

LEE, W.S. & SU, T.T.; *Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 highstrength alloy steel under quenched and tempered conditions*. Journal of Materials Processing Technology, Volume 87, Páginas 198-206, Issues 1-3, 1999.

LIMA, A.; SILVA, C.; BERNARDES, C.; CHAVES, E.; BORDINASSI, E.; DELIJAICOV, S.; *Refrigeração no torneamento do aço inoxidável super duplex*. Máquinas e Metais, Ano 53, Nº 615, 2017.

LOUREIRO, J.P; *Caracterização do Aço Inoxidável UNS S31803 pela Técnica Não Destrutiva de Correntes Parasitas Pulsadas*, Monografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.

MACHADO, A.R.; ABRÃO, A.M.; COELHO e R.T.; SILVA, M.B. da; *Teoria da Usinagem dos Materiais*, 1ª ed., São Paulo, Brasil, Editora Blücher, 2009.

OUTOKUMPU: "High Performance Stainless Steel", In: *Handbook of Stainless Steel*, Finlândia, 2013.

RAMOS, C. A. D., "*Usinabilidade de Aços Inoxidáveis para Matrizes ABNT 420 e VP 80 no Fresamento de Topo Usando Superfícies de Resposta*". Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, 2004.

RAYMUNDO, E.; AMBROZIN, E.; RIBEIRO, R.; TOLEDO, J.; SOUZA, J.; *Análises dos*

Cavacos Gerados no Processo de Fresamento do Aço Inoxidável Duplex UNS S31803 (SAF 2205) como recebido, Artigo, Centro Universitário Salesiano de Lorena UNISAL, São Paulo, São Paulo, Brasil, 2014.

RODRIGUES, L.E.M.J; *Ensaio Mecânicos de Materiais: Ensaio de Dureza*, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, São Paulo. Disponível em: <<http://www.engbrasil.eng.br/pp/em/aula3.pdf>>. Acesso em: 09 jul. 2017.

SÁ, V.M., *Avaliação do desgaste da ferramenta de metal duro revestida com TiN no fresamento do aço abnt4140 temperado e revenido, utilizando duas fresas de diâmetros diferentes*, Dissertação, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Minas Gerais, Brasil, 2010.

SILVA F.; *Análise do Torneamento do Aço Inoxidável ABNT 304 através da Temperatura do Cavaco*. 17º Simpósio do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, 2007.

STOETERAU, R.L.; *Processos de Usinagem: Fabricação por Remoção de Material*. Universidade de São Paulo, Brasil, 2004.

STOETERAU, R.L.; *Fundamentos dos processos de usinagem*. Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/PMR2202-AULA%20RS1.pdf>> Acesso em 26 de setembro de 2017.

TMR Stainless, *Orientações práticas para o processamento dos aços inoxidáveis Duplex*, 2ª ed, IMOIA International Molybdenum Association, Londres, UK, 2012.

Tools United, *Tool data*, disponível em: <<https://www.toolsunited.com/App/Article/ArticleDetailsPage?id=24696400130894332&SearchMode=ToolsUnited>> Acesso em: 28 de setembro de 2017.

TRENT, E.; WRIGHT, P; *Metal Cutting*, 4ª ed., Estados Unidos da América, Editora Butterworth–Heinemann, 2000.

ZHANG, Z.; WANG, Z.; JIANG, Y.; TAN, H.; HAN, D.; GUO, Y.; LI, J.; *Effect of post-weld heat treatment on microstructure evolution and pitting corrosion behavior of UNS S31803 duplex stainless steel welds*, Volume 62, Páginas 42-50, 2012.

MELO, A.; MACHADO, A.; FRANCO, S.; *Estudo de formação de trincas térmicas*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais,

Brasil, 2000.

BARBOSA, J. P., "*Materiais para Ferramenta de Corte*". Tese de Doutorado, Instituto Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, Brasil, 2004.