



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

VÍTOR DIONIZIO SANTOS

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NA
PLASTIFICAÇÃO DO CAVACO OBTIDO NO TORNEAMENTO DO AÇO
INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 304**

MOSSORÓ – RN

2019

VÍTOR DIONIZIO SANTOS

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NA
PLASTIFICAÇÃO DO CAVACO OBTIDO NO TORNEAMENTO DO AÇO
INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 304**

Projeto de Conclusão de Curso II apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido –
UFERSA, campus Mossoró para obtenção de
título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ramsés Otto Cunha Lima
– UFERSA.

MOSSORÓ – RN

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S237e Santos, Vítor Dionizio.
Estudo da influência dos parâmetros de corte na
plastificação do cavaco obtido no torneamento do
aço inoxidável austenítico AISI 304 / Vítor Dionizio
Santos. - 2019.
62 f. : il.

Orientador: Ramsés Otto Cunha Lima.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2019.

1. Plastificação. 2. Metalografia. 3. Metal
duro. 4. AISI 304. I. Cunha Lima, Ramsés Otto,
orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

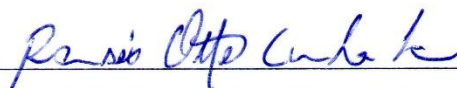
VÍTOR DIONIZIO SANTOS

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NA
PLASTIFICAÇÃO DO CAVACO ÓBTIDO NO TORNEAMENTO DO AÇO
INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 304**

Projeto de Conclusão de Curso II apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido –
UFERSA, campus Mossoró para obtenção de
título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Defendido em 13/03/2019

BANCA EXAMINADORA



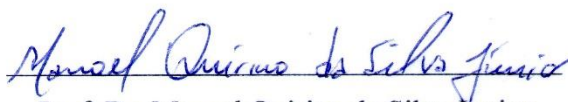
Prof. Dr. Ramsés Otto Cunha Lima

Presidente



Prof. Dr. Francisco Evaristo Uchoa Reis

Membro examinador



Prof. Dr. Manoel Quirino da Silva Junior

Membro examinador

A Manoel Dionizio Neto e Maria de Lourdes Dionizio Santos, pais presentes, carinhosos, incontáveis vezes pacientes, amorosos, e que sempre se preocuparam e garantir uma formação ética dos filhos, sem nunca poupar esforços para isso.

Sofia Dionizio Santos e Hugo Dionizio Santos, irmãos que sempre, me ajudaram a crescer pessoalmente e profissionalmente seguindo os passos que nossos pais nos ensinaram.

Wennia Galdino, esposa dedicada que sempre me ajudou desde que entrou em minha vida, estando ao meu lado em todas as situações boas e ruins, mas especialmente nas boas, desde o nascimento de nossa filha.

Cecília Galdino Dionizio, filha querida que tem me ensinado dia após dia o que é amor incondicional, a ser uma pessoa mais paciente e calma.

AGRADECIMENTOS

Durante a construção desse trabalho, muitas pessoas estiveram envolvidas direta e indiretamente, e sem essas não seria possível a realização do mesmo.

Agradeço aos meus pais por todo amor, apoio, paciência e compreensão durante essa jornada na minha formação. Meus irmãos, que sempre tiveram uma paciência colossal e sempre estiveram ao meu lado. Minha querida esposa Wennia Galdino, por suportar a distância em que vivemos por um longo período e minha ausência cada dia que tive que deixar de estar em casa para passar na universidade dedicado ao curso, e todo o tempo sempre me apoiou e me deu carinho, principalmente cuidando de nossa filha Cecília, que tem sido uma fonte de renovação de forças todos os dias desde seu nascimento.

A UFRSA, por ter dado as ferramentas que me permitiram chegar ao final desse ciclo de maneira satisfatória. Aos professores dessa instituição pelos ensinamentos em todo o meu percurso acadêmico, especialmente meu orientador Ramsés Otto Cunha Lima, pelo acolhimento na orientação deste trabalho, e também conhecimento compartilhado para confecção desse, bem como cada ajuda em etapas mais complicadas no seu decorrer.

Aos membros da banca pela disposição e pelos conhecimentos compartilhados na avaliação desse trabalho.

RESUMO

A deformação plástica que um material apresenta quando é usinado varia de acordo com diferentes elementos de liga ou tratamentos térmicos que o mesmo é submetido. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho foi identificar parâmetros de usinagem que permitissem usinar o aço inoxidável austenítico AISI 304 sem que houvesse plastificação do cavaco, ou com a mínima ocorrência deste, ou seja, com menor ou nenhuma deformação plástica do mesmo durante o processo de usinagem. Para a avaliação das variações nos processos envolvidos na formação do cavaco foram realizados ensaios de usinagem a partir da combinação de parâmetros como velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de corte com uma ferramenta de metal duro revestida. Após esses, os cavacos obtidos foram classificados e, subsequentemente, passados pelo processo de metalografia para análise microestrutural em microscópio ótico. A ferramenta de usinagem foi analisada através de um microscópio eletrônico de varredura para identificação dos mecanismos de desgaste que a ferramenta de corte sofreu através das técnicas de elétrons secundários e elétrons retroespalhados. Para determinação do acabamento superficial da peça usinada, essa passou por uma análise com um rugosímetro. A partir dessas análises foi possível concluir que o parâmetro que obteve os melhores resultados de qualidade de acabamento superficial possuía a maior velocidade de corte, e velocidade de avanço e profundidade de corte intermediárias, gerando o mínimo de plastificação no cavaco observado na metalografia.

Palavras-chave: Plastificação. Metalografia. Metal duro. AISI 304.

ABSTRACT

The plastic deformation that a material exhibits when machined varies according to different alloying elements or heat treatments that it is subjected to. The aim of the present work was to identify machining parameters that would allow the AISI 304 austenitic stainless steel to be machined without any chip plastification, or with the least occurrence of the chip, that is to say with less or no plastic deformation during the process of machining. To evaluate the variations in the processes involved in the chip formation, machining tests were performed from the combination of parameters such as cutting speed, feed speed and depth of cut with a coated carbide tool. After that, the obtained chips were classified and subsequently passed through the metallography process for microstructural analysis under an optical microscope. The machining tool was analyzed through a scanning electron microscope to identify the wear mechanisms that the cutting tool suffered through the techniques of backscattered secondary electrons and electrons. To determine the surface finish of the machined part, it was analyzed with a roughness meter. From these analyzes it was possible to conclude that the parameter that obtained the best results of surface finish quality had the highest cutting speed, intermediate feed speed and depth of cut, generating the minimum of plastification in the chip observed in the metallography.

Keywords: Plastification. Metallography. Carbide. AISI 304.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação da formação do cavaco - modelo de carta	13
Figura 2: Tipos básicos de cavaco produzidos na usinagem ortogonal.....	15
Figura 3: Formas de variação da forma do cavaco	18
Figura 4: Curva tensão X deformação para dois tipos de material.....	20
Figura 5: Formação do cavaco em um aço temperado (63HRC)	21
Figura 6: Curvas de estresse residual em peças usinadas	22
Figura 7: Representação genérica da ferramenta de corte (a), fotografia do inserto (b). 28	
Figura 8: Representação genérica do suporte da ferramenta de corte(a), fotografia do porta-ferramenta (b).....	30
Figura 9: Aço AISI 304 no forma que foi adquirido (aumento de 500x).....	36
Figura 10: Amostra 1.1 (aumento de 1000x).....	37
Figura 11: Amostra 1.2 (aumento de 1000x).....	38
Figura 12: Amostra 1.3 (aumento de 1000x).....	38
Figura 13: Amostra 2.1 (aumento de 1000x).....	39
Figura 14: Amostra 2.2 (aumento de 1000x).....	40
Figura 15: Amostra 2.3 (aumento de 1000x).....	40
Figura 16: Amostra 3.1 (aumento de 1000x).....	41
Figura 17: Amostra 3.2 (aumento de 1000x).....	41
Figura 18: Amostra 3.3 (aumento de 1000x).....	42
Figura 19: Aresta $A_p = 1\text{mm}$, aumento de 100x.	44
Figura 20: Aresta $A_p = 1\text{mm}$, aumento de 500x.	45
Figura 21: Superfície de Saída $A_p = 1\text{mm}$, aumento de 1000x.....	46
Figura 22: Aresta $A_p = 2\text{mm}$, aumento de 100x	47
Figura 23: Aresta $A_p = 2\text{mm}$, aumento de 500x	48
Figura 24: Superfície de saída $A_p = 2\text{mm}$, aumento de 1000x	48
Figura 25: Aresta $A_p = 3\text{mm}$, aumento de 100x	49
Figura 26: Aresta $A_p = 3\text{mm}$, aumento de 300x	50
Figura 27: Superfície de saída $A_p = 3\text{mm}$, aumento de 1000x	50
Figura 28: Valores de rugosidade obtidos	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química (% em massa) do aço inoxidável AISI 304	28
Tabela 2: Valores numéricos para representação geométrica da ferramenta de corte....	29
Tabela 3: Velocidade de corte para TNMG 160404-TF IC907.....	29
Tabela 4: Valores numéricos para representação geométrica do porta-ferramenta.....	30
Tabela 5: Escalas padronizadas de dureza e forças para ensaio	32
Tabela 6: Parâmetros de usinagem adotados para o Torno CNC	33
Tabela 7: Detalhes observados nas microscopias óticas	43
Tabela 8: Mecanismos de desgaste avaliados na ferramenta de corte.....	51
Tabela 9: Dados dureza	51
Tabela 10: Valores e Padrões de rugosidade encontrados.....	53
Tabela 11: Tabela de rugosidade ABNT	54
Tabela 12: Classificação e propriedades dos cavacos obtidos	56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	12
3 REFERENCIAL TEÓRICO	13
3.1 MECANISMOS DE FORMAÇÃO DO CAVACO	13
3.2 MORFOLOGIA DO CAVACO	17
3.3 ALTERAÇÃO DA FORMA DO CAVACO	18
3.4 FATORES DE INFLUÊNCIA NA PLASTIFICAÇÃO DO CAVACO	19
3.5 ASPECTOS METALÚRGICOS ENVOLVIDOS NA USINABILIDADE	23
3.6 LIGAS METÁLICAS EMPREGÁVEIS	25
4 MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1 ASPECTOS GERAIS.....	27
4.2 MATERIAIS DE TRABALHO	27
4.2.1. Material base	27
4.2.2 Ferramenta	28
4.2.3 Porta-Ferramenta	30
4.2.4 Máquina-Ferramenta	31
4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	31
4.3.1 Análise microestrutural – metalografia.....	31
4.3.2 Ensaios mecânicos.....	31
4.3.2.1 Dureza e microdureza Vickers	31
4.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	32
4.4.1 Ensaios	32
4.4.1.1 Ensaio dos corpos de prova para caracterização do material	32
4.4.1.2 Ensaio de usinagem para caracterização e avaliação dos cavacos	33
4.4.2 Caracterização do cavaco.....	34
4.4.3 Avaliação da rugosidade	34
4.4.4 Análise de Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	34
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS.....	35
5.1.1 Microscopia	35
5.1.1.1 Microscópio ótico	35
5.1.1.2 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	43

5.1.2 Ensaios mecânicos.....	51
5.1.2.1 Dureza.....	51
5.1.3 Rugosidade	52
5.2 Ensaio de usinagem	55
6 CONCLUSÃO.....	57
REFERÊNCIAS	58
APÊNDICE	60

1 INTRODUÇÃO

A plastificação de cavaco é a deformação plástica que um material sofre durante o processo de usinagem. Essa deformação gera a dificuldade de realizar o processo de usinagem, o que leva ao maior desgaste de ferramenta, bem como afeta a qualidade de acabamento superficial da peça usinada.

Rodrigues (2015) trata a dificuldade em se cortar um determinado material como “emplastramento”, ou “empastamento”, associado à dificuldade que uma ferramenta tem de cortar um material e assim gerar o cavaco.

Assim, considerando um mesmo material, Rodrigues (2015) cita que a partir de mudanças como adição de um elemento químico ou mudança no tratamento térmico para poder se realizar a usinagem, o mesmo material que tem uma dada característica de usinagem pode se tornar mais fácil de usinar, ou mais difícil expondo, dessa forma, a relação que existe entre a ductilidade de um material deformar muito antes de iniciar a formação do cavaco, ou deformar muito pouco para já formar o cavaco.

Usinagem é qualquer operação que tenha por objetivo conferir a uma peça forma, dimensão ou acabamento, podendo ser combinação de qualquer um desses itens (FERRARESI, 2003).

A formação do cavaco influencia em diversos fatores ligados diretamente à usinagem, como desgaste da ferramenta, esforços de corte, calor gerado, penetração do fluido de corte, gerando dessa forma, uma interligação entre a formação do cavaco e fatores econômicos, qualidade da peça, segurança do operador e utilização adequada da máquina-ferramenta (DINIZ, 2002).

Assim, a análise da plastificação do cavaco permite avaliar o quanto o material usinado sofreu deformação, bem como quanto desgaste a ferramenta de corte sofreu e, consequentemente, associado à análise da rugosidade superficial decorrente de cada processo, permite chegar a um conjunto de parâmetros de usinagem em que o desgaste da ferramenta não é tão elevado, a qualidade superficial deixada pela ferramenta de usinagem é a melhor possível, e o encruamento, ou plastificação, sofrido pelo material durante esse processo é o menor possível.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar, por meio de usinagem, variações nos processos envolvidos na formação de cavacos, avaliando os fatores que venham a ser determinantes para sua plastificação, bem como de que forma melhorar sua formação, para que impacte menos na redução da vida útil da ferramenta, e aumente a qualidade final da peça usinada ao mesmo tempo.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar usinagem com inserto de metal duro revestido com TiAlN que permitam repetição sem demasiada variação nas amostras obtidas a partir da usinagem de um tarugo de aço inoxidável da série 304 em um torno CNC;
- Analisar forma e tipo dos cavacos formados, avaliando por meio de metalografia as estruturas formadas após a usinagem;
- Verificar o desgaste da ferramenta de corte com auxílio de microscópio eletrônico de varredura;
- Realizar a análise de dados coletados e avaliar quais ensaios possibilitam uma melhor formação do cavaco;
- Analisar que fatores foram impactantes verdadeiramente na qualidade final das peças usinadas, e na vida útil da ferramenta de corte.

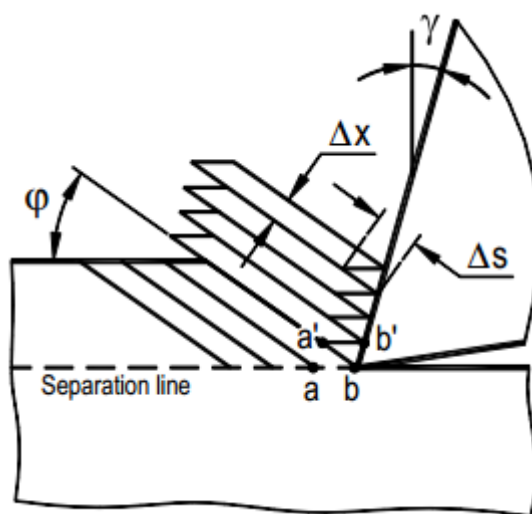
3 REFERENCIAL TEÓRICO

O processo de formação do cavaco é determinado por diversos fatores dependentes e independentes do operador, e determinante para diversos outros fatores, como segurança, vida útil da ferramenta, da máquina-ferramenta, da qualidade da peça, custo, entre outros vários fatores. Todos esses fatores e esse processo de formação são descritos por diversos autores, e as discussões sobre essa problemática pode-se ver a seguir.

3.1 MECANISMOS DE FORMAÇÃO DO CAVACO

Astakhov (2010) explica que a maneira mais simples e intuitiva de se validar qualquer modelo de usinagem de metal, é comparar a forma e a estrutura do cavaco obtida em modelagem e verificação em teste realizado nas mesmas condições. Explica ainda, que o modelo mais comum de se representar o processo de usinagem é o modelo de cartas, proposto por Piispanen (1937), que é muito útil para ilustrar a tensão de cisalhamento desenvolvida e o diagrama de velocidade do processo de usinagem. Conforme pode ser observado na Figura 1, nesse modelo os elementos infinitesimais são deslocados pela ferramenta de corte com uma espessura finita Δx , e também cada elemento infinitesimal é afastado de sua vizinhança uma distância Δs , durante a formação do cavaco.

Figura 1: Representação da formação do cavaco - modelo de carta



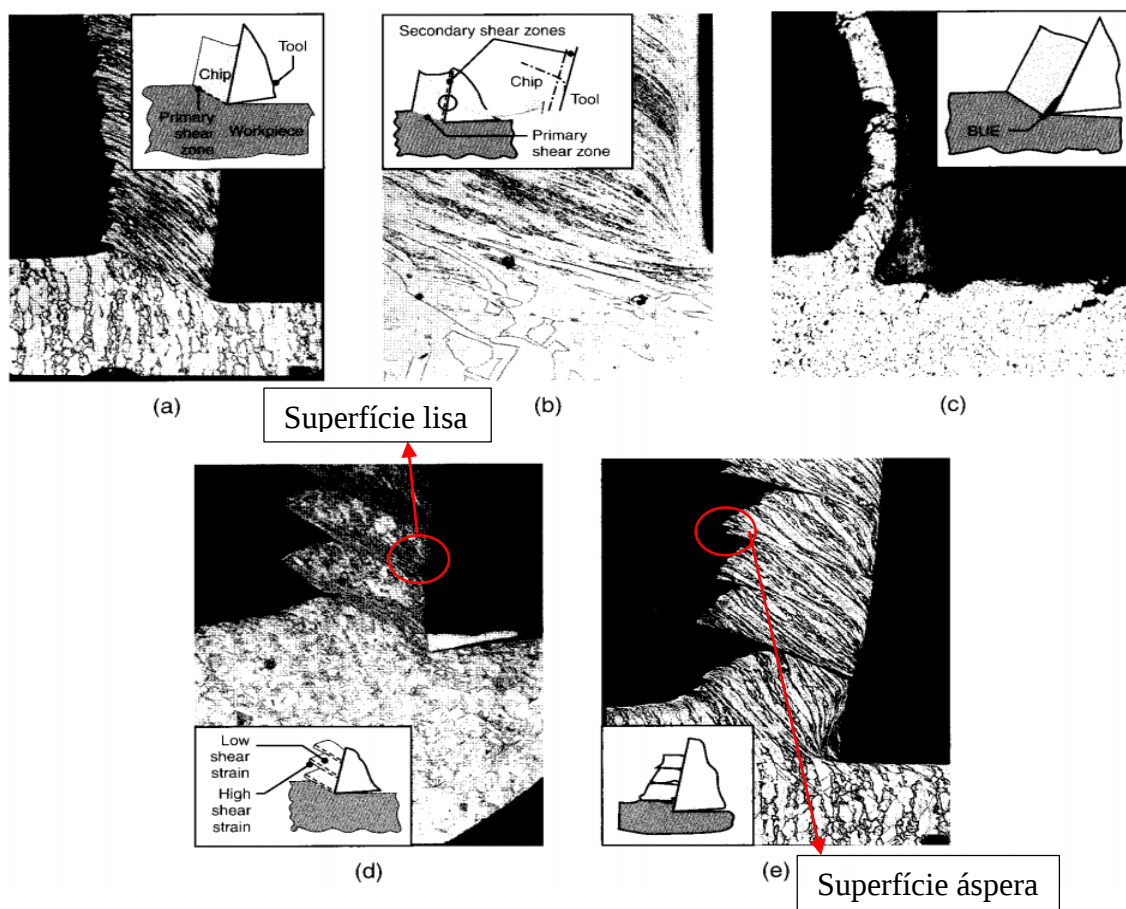
Fonte: Astakhov (2010)

Astakhov (2010) cita ainda que esse modelo aparece em todo material escrito sobre usinagem de metal e formação de cavaco. Mas dois problemas óbvios nunca foram explicados. O primeiro é que de acordo com a Figura 1, a separação de cada fragmento de cavaco deveria convenientemente alinhar com ab e se tornar $a'b'$, isto é, cada fragmento de cavaco deveria fraturar do resto da peça usinada na direção do movimento de corte, o que é fisicamente impossível. Segundo, é a maneira incerta de lidar com os espaços vazios (triângulo $ba'b'$), à medida que eles não podem ser observados na prática.

Astakhov (2010) continua ainda que, para resolver essas contradições, foi assumido que a espessura de um único cavaco seria $\Delta x \rightarrow 0$ no processo real de usinagem, para que não houvesse fratura nem espaços vazios. Assim, a estrutura do cavaco deveria ser uniforme. Porém essa consideração não só falhou para resolver o problema, como criou mais dois. Pois se $\Delta x \rightarrow 0$, então a tensão deveria tender ao infinito. Além disso, a estrutura do cavaco não inclui fragmentos e separadores, e também, à medida que a velocidade de corte aumentasse, essas separações e tornariam mais evidentes mesmo para materiais com alta ductilidade.

Kalpajian & Schmid (2014) explica os cavacos comumente observados, como sendo contínuos, segmentados (ou serrilhados) e descontínuos. Pode-se observar que o cavaco possui duas superfícies: uma que esteve em contato com a superfície inclinada da ferramenta de corte, com aparência brilhante e polida, como pode ser visto na Figura 2, causada pelo deslizamento do cavaco sobre a ferramenta, e, a superfície exterior, que tem aparência irregular e áspera, também observado na Figura 2 (indicações), causada pelo mecanismo de cisalhamento da ferramenta.

Figura 2: Tipos básicos de cavaco produzidos na usinagem ortogonal



Fonte: Kalpajian & Schmid (2014)

Conforme a Figura 2, tem-se os tipos básicos de cavacos, onde (a) cavaco contínuo com zona de cisalhamento na superfície de cisalhamento primária, (b) cavaco contínuo com zona de cisalhamento na superfície secundária, (c) aresta postiça de corte, (d) cavaco segmentado e por fim, (e) cavaco descontínuo Kalpajian & Schmid (2014).

Ferraresi (2003) explica que a formação pormenorizada da formação do cavaco não é o foco de sua obra, porém explica que o estudo experimental da usinagem é essencial, pois a “teoria da plasticidade” não permite explicar satisfatoriamente os fenômenos que podem ser observados durante os processos de usinagem, haja vista que as velocidades e deformações que ocorrem durante a formação do cavaco são muito grandes quando comparadas com a teoria.

Ainda conforme Ferraresi (2003), em geral, a formação do cavaco durante a usinagem se dá da seguinte forma: inicialmente ocorre um recalque, de uma porção de material da peça sobre a superfície de saída da ferramenta; esse material sofre deformação

plástica que aumenta progressivamente até o momento em que a tensão de cisalhamento se torna grande suficientemente para iniciar um deslizamento entre esse material e a peça.

Ferraresi (2003) salienta nesse momento que esse deslizamento ocorre segundo os planos de cisalhamento dos cristais da porção de material recalcada. Durante a usinagem, esses planos criados momentaneamente chamar-se-ão de “região de cisalhamento”; continuando o processo de formação, haverá uma ruptura parcial ou completa dessa região, a depender da ductilidade do material e das condições de usinagem e; devido ao movimento relativo ferramenta-peça, inicia-se um escorregamento da porção de material deformada e cisalhada, agora chamada de cavaco, sobre a superfície de saída da ferramenta. O passo que ocorre isso, uma nova porção de material da peça reinicia o ciclo.

Diniz (2002) expõe que a formação do cavaco influencia em diversos fatores ligados diretamente à usinagem, como desgaste da ferramenta, esforços de corte, calor gerado, penetração do fluido de corte, gerando dessa forma, uma interligação entre a formação do cavaco e fatores econômicos, qualidade da peça, segurança do operador e utilização adequada da máquina-ferramenta. Além disso, o corte de metais envolve o cisalhamento concentrado ao longo de um plano (plano de cisalhamento), em que o ângulo entre o plano de cisalhamento e a direção do corte é chamada de ângulo de cisalhamento. Assim, quanto maior a deformação do cavaco, menor o ângulo de cisalhamento e maiores os esforços de corte.

Ainda de acordo com Diniz (2002), o controle da forma do cavaco é fundamental, pois implica nos seguintes problemas: segurança do operador (um cavaco muito longo, em forma de fita, pode atingir o operador, e causar sérios ferimentos), danos à ferramenta e à peça (mais uma vez o cavaco longo pode enrolar-se na peça, danificando o acabamento superficial, ou mesmo penetrar a interface peça-ferramenta e quebrar a ferramenta), manuseio e armazenamento do cavaco (um cavaco longo é muito mais difícil de armazenar e manusear do que um cavaco curto) e por fim, forças de corte (no intuito de deformar mais o cavaco visando sua quebra, pode-se aumentar em demasia os esforços de corte, diminuindo a vida da ferramenta).

Diniz (2002) expõe que a forma como o cavaco é formado e expulso da interface peça-ferramenta é determinada pelos ângulos da ferramenta de corte, bem como por obstáculos que possam ser colocados nesse caminho, como o “quebra-cavacos”. Essa deformação preferencialmente deve ser vertical, pois a deformação lateral ocorre geralmente em decorrência de um alto gradiente de velocidade, como na furação ou torneamento de peças de pequeno diâmetro com alta profundidade de corte.

Diniz (2002) explica que é interessante que ocorra a curvatura do cavaco com consequente quebra para que não ocorra a formação de cavaco longo como o de fita. As formas como o cavaco irá quebrar são as mais diversas, como explica, o cavaco pode se dobrar verticalmente e se quebrar ao atingir a peça, pode se dobrar verticalmente e se enrolar sobre si mesmo quando tocar a peça, ou se dobrar verticalmente e lateralmente e se quebrar quando atingir a superfície de folga da ferramenta, ou ainda se dobrar lateralmente e se quebrar quando atingir a superfície da peça que ainda não foi usinada.

Para compreender melhor tudo o que foi explicado, Diniz (2002) expõe uma equação, a qual deve ser satisfeita para que ocorra a quebra do cavaco, sendo ela a Equação 1 disposta a seguir:

$$\varepsilon_r \leq \alpha \cdot h_D \cdot \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_1} \right) \quad (1)$$

Onde h_D é a espessura do cavaco, $\alpha \cdot h_D$ a distância entre a linha neutra e a superfície do cavaco, R_0 o raio de curvatura do cavaco, R_1 menor valor de R_0 onde ainda se evita o choque com o porta-ferramenta ou outro obstáculo e ε_r é a deformação limite na ruptura do material.

3.2 MORFOLOGIA DO CAVACO

Ferraresi (2003) expõe os principais tipos de cavaco, que são em geral diferenciados por sua forma. Ressalta ainda que certas formas de cavaco afetam a operação, a qualidade e a duração da ferramenta, considerando que podem danificar o acabamento superficial, ou desgastar em demasia a ferramenta, por exemplo.

Ainda conforme Ferraresi (2003), pode-se alterar a forma do cavaco através de mudanças nas condições de usinagem, dando forma especial à superfície de saída da ferramenta ou mesmo colocando elementos adicionais na superfície de saída.

Assim, pode-se dar continuidade quanto à classificação, expondo as vantagens e desvantagens que cada tipo e forma traz, além das supracitadas.

- Cavaco Contínuo: como o próprio nome diz, é um cavaco que se forma continuamente, não permitindo distinção entre uma lamela e outra. Comum em materiais dúcteis.

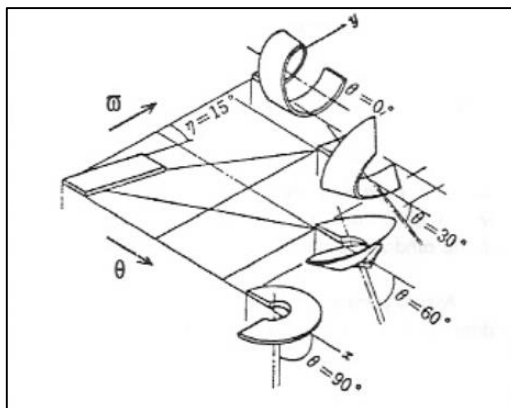
- Cavaco de Cisalhamento: as lamelas apresentam-se de forma justapostas, mas bem definidas.
- Cavaco de Ruptura: são caracterizados por fragmentos arrancados da peça.

Enquanto que os demais são mais simples em todos os aspectos, incluindo facilidade de armazenamento para o cavaco em lascas ou quando será removido por ação de fluido refrigerante sob alta pressão, ou o helicoidal quando se trabalha com fresamento frontal ou faceamento (DINIZ, 2002).

3.3 ALTERAÇÃO DA FORMA DO CAVACO

Diniz (2002) afirma que para variar a forma do cavaco pode-se alterar através de mudanças nos ângulos de curvatura vertical (ω), curvatura lateral (θ) e ângulo de fluxo do cavaco (η), conforme pode ser observado na Figura 3.

Figura 3: Formas de variação da forma do cavaco



Fonte: Diniz (2002)

Ainda conforme Diniz,

“A melhor forma de se promover a curvatura vertical é a colocação de um obstáculo no caminho do fluxo do cavaco, o qual é chamado de quebra-cavacos. O aumento da deformação do material sendo usinado via diminuição dos ângulos de saída e/ou inclinação da ferramenta e aumento do atrito cavaco-ferramenta, também promovem a curvatura vertical. A curvatura lateral do cavaco ocorre quando há um gradiente de velocidade de corte (v_c), consequentemente da velocidade de saída do cavaco) ao longo da aresta de corte, como é o caso da

furação e do torneamento de peças de pequeno diâmetro com alta profundidade de corte. [...]” (DINIZ, 2002, p. 53).

Outros fatores que Diniz (2002) cita serem importantes nesse processo são a velocidade de corte, profundidade de corte e geometria da ferramenta. Já que em cada condição, diferentes formas de cavacos são obtidas, sabe-se que em baixas velocidades de corte os cavacos não costumam apresentar problema quanto à quebra, inverte quando se trabalha com as velocidades de corte limite da ferramenta. Grandes profundidades de corte auxiliam a quebra do cavaco, bem como a relação entre o raio de ponta e a profundidade de usinagem.

Kalpajian & Schmid (2014) colocam a velocidade como um fator determinante nas ferramentas de alta velocidade, pois estas podem sofrer deformação plástica em decorrência da alta temperatura na zona de corte, pois esta pode facilmente superar 1000°C. Além disso, outros problemas como desgaste da ponta da ferramenta, e lascamentos ou entalhes podem ser observados na ferramenta em decorrência da forma que o cavaco possui no momento que sai da peça e não mais está em contato com a ferramenta.

Dessa forma, a problemática passa a tratar do monitoramento da ferramenta, que se dá geralmente nas seguintes formas: direta, indireta, acústica, por transdutores ou em máquinas-ferramenta CNC através do tempo de ciclo da ferramenta. E a importância que se tem (KALPAJIAN & SCHMID, 2014).

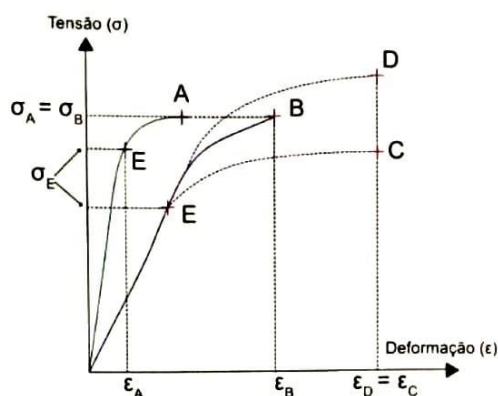
Assim, além de ser necessário saber como alterar a forma do cavaco, é necessário que se saiba que fatores verdadeiramente estão ligados direta e indiretamente na sua plastificação.

3.4 FATORES DE INFLUÊNCIA NA PLASTIFICAÇÃO DO CAVACO

Rodrigues (2015) explica que o cavaco varia sua forma de acordo com a dureza do material usinado, considerando que um material frágil produz geralmente um cavaco curto (de ruptura) e um material dúctil produz um cavaco médio ou longo (fita).

Conforme a Figura 4, é possível visualizar as diferentes formas através da qual um material pode deformar durante uma usinagem.

Figura 4: Curva tensão X deformação para dois tipos de material



Fonte: Rodrigues (2015).

Assim, segundo Rodrigues (2015), o tipo de cavaco formado depende da relação tensão-deformação do material usinado, e é possível inferir a partir da Figura 4 as seguintes informações: o Ponto “C” apresenta maior deformação que os pontos “A” e “B”, porém mesmo com a deformação maior em “C”, “A” e “B” possuem tensão maiores.

Dessa forma, o cavaco que percorre as curvas “EC” ou “ED” invés da curva “EB”, deformou mais até a ruptura. E esse acréscimo não linear de deformação Rodrigues (2015) o chama de “plastificação do material”, que é o conceito observado com o aumento da deformação sem aumento da tensão, entre as curvas “EC” e “ED” (ligas mais dúcteis) ou em ligas menos dúcteis, que aumentam a sua resistência à medida que o cavaco se forma.

Rodrigues (2015) afirma que quando ocorre essa plastificação, ocorre também aumento da resistência para formação do cavaco, implicando diretamente em uma maior demanda de energia para rompimento deste. Assim, essa energia pode ser obtida através de variações nos parâmetros de corte, de forma que se o material plastifica sem aumento da resistência, uma simples variação no avanço da ferramenta de corte será suficiente para que ocorra nova formação do cavaco.

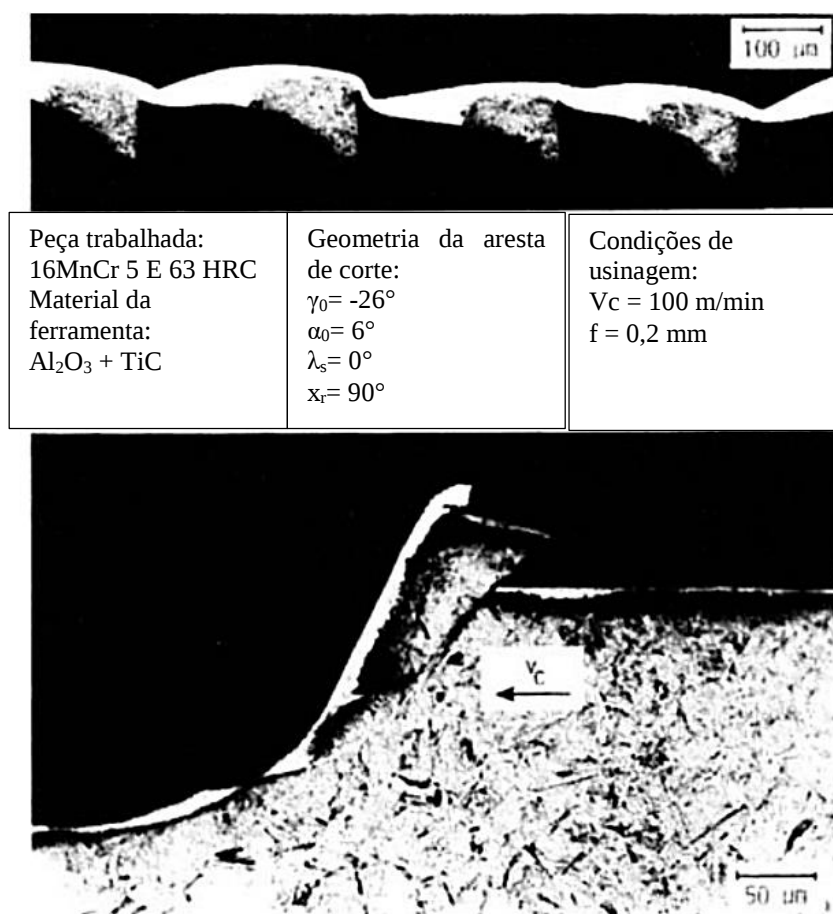
Mas por outro lado, se o material sofrer aumento na resistência após a plastificação (encruamento), não haverá qualquer outra saída para formar o cavaco senão alterar a geometria da ferramenta de corte para vencer a resistência do material, conclui Rodrigues (2015).

Explicando a influência do ângulo de saída da ferramenta, e associando ao alto estresse envolvido durante o processo de usinagem, König, Klinger e Link (1990), explicam que o ângulo negativo de saída da ferramenta e a interface da peça usinada

provocam elevados níveis de estresse na peça, resultando na fratura e na plastificação do cavaco removido.

Dessa forma, pode ser observado que o ângulo de saída da ferramenta é um fator inicial associado à plastificação do cavaco, justamente por causar um estresse muito elevado na interface cavaco/ferramenta. A Figura 4 demonstra como König, Klinger e Link (1990) expõe em forma de imagem a formação do cavaco em um aço temperado com dureza 63 HRC.

Figura 5: Formação do cavaco em um aço temperado (63HRC)



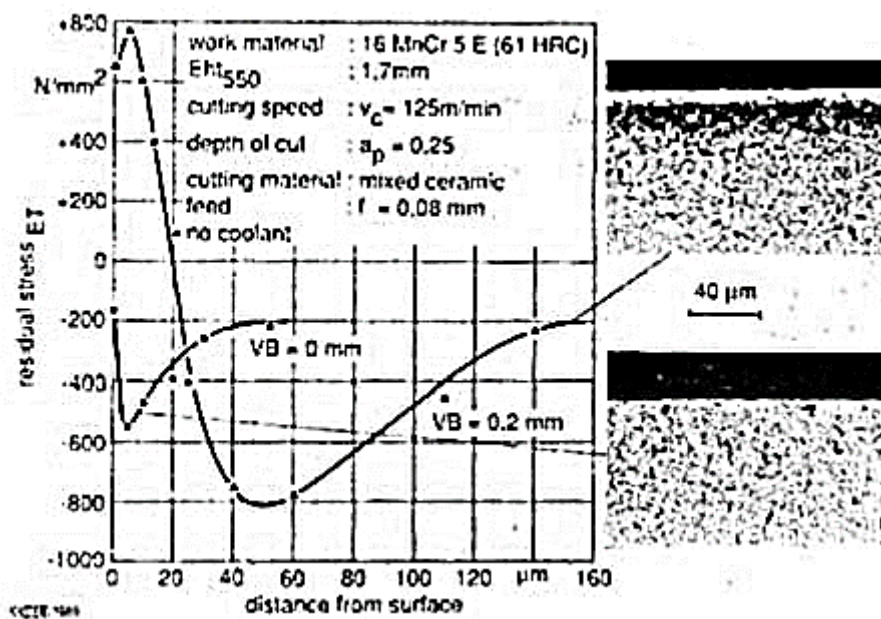
Fonte: König, Klinger e Link (1990)

König, Klinger e Link (1990) explicam que o calor gerado durante o processo de corte é suficiente para gerar o aumento de temperatura capaz de promover a plastificação do cavaco. Para tal, a temperatura pode ser calculada a partir da potência aplicada, que é o resultado do produto da velocidade de corte com o calor dissipado (este último calculado a partir da condutividade térmica da ferramenta, do material da peça trabalhada e do ambiente de trabalho).

König, Klinger e Link (1990) complementam o raciocínio afirmando que os segmentos de cavacos são ligados por uma pequena porção de material que é plasticamente deformada e aquecida a uma alta temperatura. Assim, um cavaco contínuo é formado. E na maioria dos casos a temperatura necessária para endurecer novamente a superfície inferior do cavaco é criada apenas pela fricção nessa face.

Finalizando sua avaliação dos fatores envolvidos na formação do cavaco durante a usinagem, König, Klinger e Link (1990) explicam que durante o processo de formação do cavaco influencia na tensão residual da peça usinada, sendo esse fator de particular interesse, uma vez que relacionado com a tolerância e a rugosidade, influenciam diretamente o comportamento do componente (peça acabada). Assim, conforme a Figura 6, a formação do cavaco gera altas forças de restauração, que induzem tensões residuais na superfície da peça.

Figura 6: Curvas de estresse residual em peças usinadas



Fonte: König, Klinger e Link (1990)

Um aumento na profundidade de corte eleva a tensão residual, fato este atribuível à alta tensão mecânica imposta à peça. Assim, quanto maior o aumento na alimentação e temperatura induzida pela fricção aumentam à medida que o desgaste da ferramenta aumenta, resultando em tensão residual de tração na superfície da peça e uma maior tensão de compressão na superfície mais profunda, finalizam König, Klinger e Link (1990).

Baptista (2002) infere a partir de seu estudo que a usinabilidade de um material não é uma propriedade intrínseca do material, mas sim o resultado da interação entre o metal usinado e a operação de usinagem. Assim, cada material e ferramenta possui sua condição individual de usinagem.

Baptista (2002) expõe os critérios geralmente utilizados para avaliar a usinabilidade do metal, sendo eles a vida da ferramenta, a força da usinagem, a qualidade superficial da peça acabada e a formação do cavaco, através de sua forma e tamanho.

Complementa ainda com os fatores determinantes da usinabilidade, que são o material da peça, considerando suas propriedades internas como dureza, microestrutura, composição química, e os processos mecânicos e as condições de usinagem, como geometria da ferramenta e seu material, as condições e o ferramental disponível para a usinagem.

3.5 ASPECTOS METALÚRGICOS ENVOLVIDOS NA USINABILIDADE

Baptista (2002) explica que o melhor caminho a ser traçado e percorrido para a usinagem é conhecer bem tanto o material a ser usinado, quanto as ferramentas disponíveis para tal processo. Pois quando se tem o melhor caminho para esse processo fabril, garante-se aumento na vida da ferramenta, melhora na qualidade superficial da peça, além de redução no esforço da máquina-ferramenta e consequente economia de energia.

Dessa forma, Baptista (2002) cita os fatores básicos de influência na obtenção dos resultados supracitados durante a usinagem, sendo o trabalho a frio, a microestrutura, as características mecânicas, composição química e por fim inclusões no material.

Explica que o trabalho a frio permite maior encruamento do material usinado, reduzindo as chances de formação de aresta postiça de corte, que gera tanto desgaste da ferramenta e do maquinário, quanto aumento no consumo de energia, porém, em materiais que apresentam alta taxa de encruamento o trabalho a frio provoca queda na usinabilidade.

Sobre a microestrutura, Ferraresi (2003) cita que a possibilidade de transformação da microestrutura do aço ou ferro fundido sem alteração da composição química, ou seja, os microconstituintes de uma liga podem alterar as características de ductilidade e fragilidade, em decorrência de sua presença, quantidade ou mesmo forma, promovendo condições diferentes de quebra de cavaco, abrasividade, força necessária para o corte, e

mesmo a temperatura de corte. Cita ainda a importância de controlar o tamanho do grão, haja vista sua interferência positiva (grãos finos) ou negativa (grãos grosseiros) na usinagem.

Chiaverini (1988) afirma que valores elevados de dureza implicam e dificuldade na usinagem, enquanto que valores médios/baixos se associam a boas usinabilidade, mas adverte que não se deve utilizar isso como de modo absoluto para determinar verdadeiramente a usinagem.

Baptista (2002) expõe ainda que a melhora na usinabilidade pode criar conflitos entre alta ductilidade e baixa resistência à tração, bem como maior fragilidade, ou seja, um material que eventualmente possa não atender às propriedades mecânicas desejadas caso seja atribuído a ele melhores condições para sua usinagem, face ao resultado da peça final.

A composição química é mais um fato importante quanto a usinabilidade de um metal, tendo em vista que adição de elementos de liga produz mudanças microestruturais, que refletem nas propriedades mecânicas e consequentemente na usinabilidade, a depender da quantidade, forma e distribuição desses elementos, cita Oliveira (1987).

Tessler (1993) afirma que os elementos ligantes podem também formar partículas duras e abrasivas prejudicando a usinabilidade do metal.

Por fim, Oliveira (1987) trata das inclusões, que trata como partículas não solúveis, e que consequentemente interrompem a continuidade do material. Sua influência pode ser positiva ou negativa a depender de fatores como dureza, forma e distribuição na peça a ser usinada.

Baptista (2002) explica que as inclusões podem ser um dos maiores nucleadores de danos no interior dos materiais, como poros e trincas durante a usinagem, sendo que esses defeitos podem funcionar como uma heterogeneidade na espessura do material, criando condições suficientes para aparecimento de estrição, e favorecer o trabalho de corte.

Dessa forma, a liga metálica a ser usinada, bem como os elementos em sua composição são responsáveis por facilitar ou dificultar a usinabilidade da peça final. Fica, portanto, o material responsável por definir, juntamente com a ferramenta de corte, o caminho da usinagem a ser utilizado, de forma a otimizar todos os fatores envolvidos nele.

3.6 LIGAS METÁLICAS EMPREGÁVEIS

Barbosa (2014), explica que a usinagem é caracterizada pela grande quantidade de deformação plástica encontrada no material em decorrência da formação do cavaco, sendo que existe um compromisso entre o processo de deformação, encruamento e amolecimento, assim como aumento da temperatura, criando bandas de cisalhamento. Assim, compreender essas zonas é importante pois podem conter informações que podem ser aplicadas ao aperfeiçoamento das técnicas de usinagem relacionadas à melhoria do processo e a busca de inovação em materiais e ferramentas.

Barbosa (2014), explica que os aços inoxidáveis por possuírem baixa usinabilidade devido ao alto grau de encruamento e baixa condutividade térmica podem facilitar as investigações da formação do cavaco após a usinagem, devido à morfologia segmentada dos seus cavacos.

Diniz (2002) infere que aços inoxidáveis apresentam características variantes a depender do tipo de aço, como o austenítico que tem facilidade de empastar sobre a ferramenta de corte, martensíticos que possuem difícil usinagem em decorrência da dureza e também outros fatores a serem citados, como baixa condutividade térmica e alto coeficiente de dilatação térmica.

Barbosa (2014), explica que, em geral, os aços inoxidáveis são escolhidos considerando suas propriedades mecânicas, físicas e químicas, como resistência à corrosão e oxidação, bem como pode ser restrita sua escolha considerando fatores como manutenção de suas propriedades em temperaturas específicas, disponibilidade e mesmo facilidade de fabricação.

Kalpajian & Schmid (2014), exemplificam as classes que os aços inoxidáveis se dividem, como austenítica (séries 200 e 300) que têm em sua composição cromo, níquel e manganês, possui excelente resistência à corrosão e quando endurecido por trabalho a frio possui excelente ductilidade e são largamente aplicados na indústria em geral.

Os aços inoxidáveis ferríticos (série 400) possuem uma alta quantidade de cromo, mas possui baixa ductilidade, além disso, o cromo não altera as propriedades do aço, e por esse motivo são chamados de ferríticos, afirma Diniz (2002).

Ainda se tem os martensíticos, (série 400 e 500), em geral não possuem níquel, possuem alta resistência mecânica, dureza e boa ductilidade, e possuem moderada resistência à corrosão, Diniz (2002).

Por fim Kalpajian & Schmid (2014) falam sobre os aços inoxidáveis que passam por endurecimento por precipitação e os duplex. O de precipitação possui cobre, titânio e molibdênio na sua composição, empregados geralmente na indústria aeroespacial, e o duplex, com microestrutura ferrítica e austenítica.

Considerando o que dizem Barbosa (2014), Diniz (2002) e Kalpajian & Schmid (2014), pode-se levar em conta que o uso de aços inoxidáveis no desenvolvimento desse estudo podem levar a um bom método avaliativo de como o material se deforma durante a usinagem, a partir do tipo de cavaco que é produzido por cada tipo de liga do tarugo (composição química e/ou tratamentos térmicos), ou mesmo da maneira como esse é usinado.

Assim, percebe-se que as diferentes famílias de aços inoxidáveis podem conduzir a bons métodos de avaliação do processo de plastificação do cavaco, conforme o levantamento feito até agora, pois permite realizar uma avaliação macroscópica do cavaco produzido na usinagem dessas ligas, bem como pode ser realizado um estudo microscópico, com auxílio da metalografia, para avaliar que microestruturas se formam durante o processo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ASPECTOS GERAIS

O presente estudo foi desenvolvido na Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, nos períodos letivos 2018.1 e 2018.2, sendo realizado o levantamento bibliográfico acerca dos processos de fabricação e dos fatores direta e indiretamente ligados à formação do cavaco, analisando a sua formação por meio de variação dos parâmetros de usinagem, como velocidade e profundidade de corte de ligas de aço inoxidável durante o uso de insertos de metal duro, no torno CNC, permitindo avaliar os resultados obtidos, buscando formas de se melhorar a formação do cavaco para, assim, prolongar a vida útil da ferramenta, melhorar a qualidade da superfície das peças trabalhadas, e melhorar o processo produtivo como um todo, através da exposição dos fatos realmente relevantes na influência da usinagem.

Conforme Rodrigues (2015), alguns materiais apresentam em determinadas situações emplastramento somente com a mudança de um ou outro elemento químico ou até mesmo de tratamento térmico. Esse emplastramento indica o quanto de energia a mais o cavaco necessitará para romper. Assim, se o material emplastra sem aumentar a resistência, seguramente a mudança de avanço será suficiente para formar um cavaco adequado para a mesma ferramenta. Por outro lado, se a resistência aumentar, a solução é alteração da geometria da ferramenta de corte para vencer a resistência do material.

4.2 MATERIAIS DE TRABALHO

4.2.1. Material base

O material usinado foi um tarugo de aço inoxidável austenítico AISI 304, que conforme a ASM (Sociedade Americana de Materiais) possui a composição química exposta na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química (% em massa) do aço inoxidável AISI 304

C	Mn (máx)	P (máx)	S (máx)	Si (máx)	Cr	Ni
0,08	2,0	0,045	0,030	1,0	18,0-20,0	8-11,0

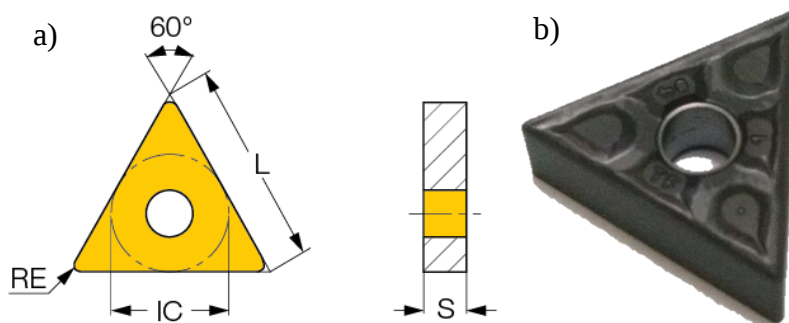
Fonte: ASM (2005)

A partir dessa escolha, o tarugo trabalhado teve diâmetro nominal de 44,45 mm equivalente a 1 $\frac{3}{4}$ polegada e comprimento de 200 mm, com base nesse mesmo corpo de prova foram realizados ensaios para verificar as propriedades deste.

4.2.2 Ferramenta

A ferramenta de corte utilizada foi um inserto de metal duro com geometria TNMG 16 04 04 907 da Iscar, conforme a Figura 7.

Figura 7: Representação genérica da ferramenta de corte (a), fotografia do inserto (b).



Fonte: (a) ISCAR (2018), (b) autoria própria

É exposto na Figura 7 a geometria da ferramenta de corte, de modo a se conhecerem suas faces, arestas e ângulos de trabalho e é exposto na Tabela 2 os valores numéricos referentes a ferramenta especificada para o trabalho.

Tabela 2: Valores numéricos para representação geométrica da ferramenta de corte

L (comprimento da aresta de corte) (mm)	16.50
IC (diâmetro do círculo inscrito) (mm)	9.52
S (espessura do inserto) (mm)	4.76
RE (raio de aresta)	0.40
ft (velocidade de avanço) (mm/volta)	0.12-0.30
ap (profundidade de corte) (mm)	1.00-3.00

Fonte: Adaptado de ISCAR (2018)

É apresentado na Tabela 2 as medidas da ferramenta de corte, bem como o intervalo da velocidade de avanço ou da profundidade de corte que pode ser empregada no uso da mesma.

As velocidades de corte que a ferramenta tolera estão descritas na Tabela 3, adaptada a partir de tabela do fabricante para as diferentes ligas metálicas usináveis pelo inserto.

Tabela 3: Velocidade de corte para TNMG 160404-TF IC907

Designação do Material	Condição do Material	Velocidades de corte recomendadas (Vc)
Aço inoxidável e aço fundido	Ferrítico/Martensítico: 200	170-265 m/min
Aço inoxidável e aço fundido	Martensítico: 240	140-245 m/min
Aço inoxidável e aço fundido	Austenítico: 180	100-280 m/min

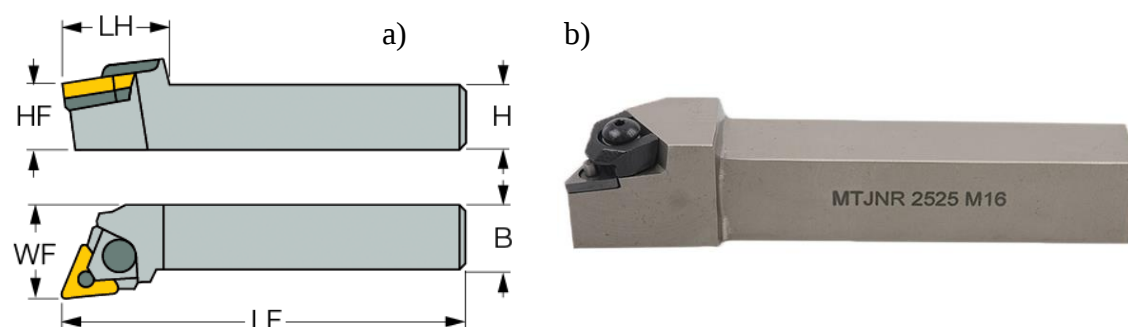
Fonte: Adaptado de ISCAR (2018)

A composição química da ferramenta apurada a partir do site do fabricante, Iscar, foi que a mesma é composta de Carbetto de Tungstênio (WC), revestido com TiAlN (nitreto de titânio-alumínio) pelo processo de PVD (deposição física de vapor).

4.2.3 Porta-Ferramenta

O porta-ferramenta foi um MTJNR 2525 K16 da marca Masterfer com medidas descritas na Figura 8. Tais medidas referenciam a compatibilidade da mesma com o torno ou com a ferramenta que pode ser inserida na mesma.

Figura 8: Representação genérica do suporte da ferramenta de corte(a), fotografia do porta-ferramenta (b).



Fonte: (a) ISCAR (2018), (b) autoria Própria

A partir da Figura 8 pode-se obter as medidas do porta-ferramenta, conforme é apresentado na Tabela 4, descrição de cada informação presente na imagem.

Tabela 4: Valores numéricos para representação geométrica do porta-ferramenta

H (altura da haste) (mm)	25
HF (altura funcional) (mm)	25
B (largura da haste) (mm)	25
LF (comprimento funcional) (mm)	125
LH (comprimento da cabeça) (mm)	32
WF (largura funcional) (mm)	25
GAMP (ângulo de inclinação axial) (mm)	-6°
GANF (ângulo de inclinação radial) (mm)	-6°
HAND (mão)	L
MIID (identificação mestre do inserto)	TNMG 160404-M3P

Fonte: Adaptado de ISCAR (2018)

4.2.4 Máquina-Ferramenta

A máquina ferramenta utilizada, disponível no laboratório de usinagem da UFERSA, foi um torno CNC da marca ROMI, modelo CENTUR 30D, com potência de 12,5 cv e velocidade de rotação máxima 4000 rpm.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.3.1 Análise microestrutural – metalografia

Para essa caracterização foi preparada uma amostra, com dimensões de 20 mm de diâmetro, e 30mm de comprimento, com auxílio do torno CNC, com posterior lixamento e polimento, além de ataque químico para preparação da superfície para análise em microscópio óptico Olympus, GX51.

4.3.2 Ensaios mecânicos

A importância desses ensaios se dá no interesse em avaliar as propriedades mecânicas (caracterização) do material, bem como avaliar condições de deformação do mesmo.

4.3.2.1 Dureza e microdureza Vickers

Para essa etapa, com posse das normas ASTM E92-82 (2003) e ASTM E384 (2011), foram feitas indentações em uma amostra do material, com microdurômetro SHIMADZU HMV-2T com carga de penetração de 50 gf, e um total de 20 indentações na amostra para obtenção do valor médio de dureza desta, conforme Tabela 5.

Tabela 5: Escalas padronizadas de dureza e forças para ensaio

Escala Vickers	Scala Knoop¹	Força de ensaio (N)	Força aproximada de ensaio (kgf)	Força aproximada de ensaio (gf)
HV 0.05	HK 0.05	0.4903	0.05	50

Fonte: Adaptado de ASTM (2017)

4.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Essa etapa constituiu da análise do encruamento, de formação e alteração de propriedades mecânicas do cavaco formado no torneamento do aço inoxidável AISI 304 com variação das condições de corte e geometria de corte, bem como caracterização do tarugo.

4.4.1 Ensaios

Considerando todo o levantamento e descrição de cada etapa e os equipamentos necessários para realização deste trabalho, foi iniciada a realização de cada etapa, cuidadosamente para evitar qualquer interferência de erros grosseiros, bem como minimização de erros sistemáticos dos equipamentos.

4.4.1.1 Ensaio dos corpos de prova para caracterização do material

Para o procedimento de metalografia, foi realizado o corte de amostras e posterior processo de lixamento e polimento na lixadeira AROTEC Aropol 2V, para então ser realizada a análise microscópica.

Para medição de dureza, os mesmos corpos de prova preparados para a metalografia foram utilizados, garantindo assim propriedades mais coerentes com o que havia sido avaliado no microscópio. Microdureza realizada em um microdurômetro

¹ O usuário deve usar o manual do fabricante antes de aplicar testes de macroindentações (acima de 1 kgf) para ensaio de dureza Knoop. O diamante pode não ser largo suficientemente para proceder com tamanhos maiores de indentações.

4.4.1.2 Ensaio de usinagem para caracterização e avaliação dos cavacos

Os ensaios foram realizados segundo as seguintes variáveis quantitativas, velocidade de corte (v_c), avanço (f_t), profundidade de usinagem (a_p) e percurso de avanço (l_f) conforme a Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros de usinagem adotados para o Torno CNC

Parâmetros usinagem Torno CNC				
Amostras	V_c (m/min)	l_f (mm)	f_t(mm/rotação)	a_p (mm)
1.1	100	10	0,3	1
1.2	100	10	0,2	2
1.3	100	20	0,1	3
2.1	180	10	0,3	1
2.2	180	10	0,2	2
2.3	180	20	0,1	3
3.1	265	10	0,3	1
3.2	265	10	0,2	2
3.3	265	20	0,1	3

Fonte: Autoria própria.

A partir da Tabela 6 é possível verificar que a rotação foi variada entre os valores de velocidade de corte permitida pelo inserto para o material trabalhado desde a mais baixa até a mais alta com uma velocidade intermediária, com percurso de avanço (L_f) configurado em 20 mm para a profundidade de corte (a_p) de 3 mm e posteriormente reduzido para 10 mm para as demais profundidades de corte.

Considerando as 3 variações nas velocidades de corte (100, 180 e 265) foi possível variar também a velocidade de avanço (de forma inversamente proporcional), entre 0,1, 0,2 e 0,3 mm/rotação, sendo utilizada uma aresta de corte para cada profundidade de corte, salientando que todos os ensaios foram realizados sem fluido de corte.

Para cada etapa, foram coletadas amostras de cavaco, para inspeção visual, classificação e preparação para embutimento seguida dos processos de metalografia e microdureza.

4.4.2 Caracterização do cavaco

A partir de cada etapa de usinagem, foram coletadas amostras de cavaco, classificando visualmente seu tipo.

Uma amostra de cada processo também passou pelo processo de metalografia, com intuito de avaliar a morfologia das bandas de cisalhamento, visando identificar a deformação plástica sofrida pelo material após o processo de usinagem.

4.4.3 Avaliação da rugosidade

Para medição da rugosidade e consequente determinação do nível de acabamento encontrado em cada etapa de usinagem, o tarugo usinado foi avaliado por um rugosímetro modelo SJ-210 da marca Mitutoyo, com *CUT-OFF* de 2.5 e após análise em cada um dos intervalos correspondentes a cada usinagem foi possível encontrar a média da rugosidade (R_a) bem como o desvio padrão encontrado para a avaliação.

Além da rugosidade média R_a , também foi avaliada rugosidade R_q , que representa valores ampliados dos picos e vales isolados ou esporádicos, podendo assim evidenciar defeitos ou marcas em superfícies bem-acabadas, como superfície de espelhos e lentes (MACHADO, 2011).

A rugosidade R_z , a partir da norma DIN é definida como a média das cinco alturas máximas detectadas e, cada comprimento de amostragem, e ainda a maior das profundidades dos vales também no comprimento de amostragem (MACHADO, 2011).

4.4.4 Análise de Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para o microscópio eletrônico de varredura, foi analisado o inserto de metal duro, com um microscópio TESCAN VEGA3, com uma tensão de 20kV (quilovolts), e aumento variado a partir do observado em cada aresta da ferramenta, em busca dos mecanismos de desgaste que essa sofreu durante a usinagem.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir daqui será apresentado todo o resultado obtido durante cada um dos processos, a partir do que foi planejado anteriormente em Materiais e Métodos, apresentando e explicando cada resultado obtido, presença ou ausência de erros associados, bem como análise estatística comparativa entre os resultados obtidos e os esperados.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

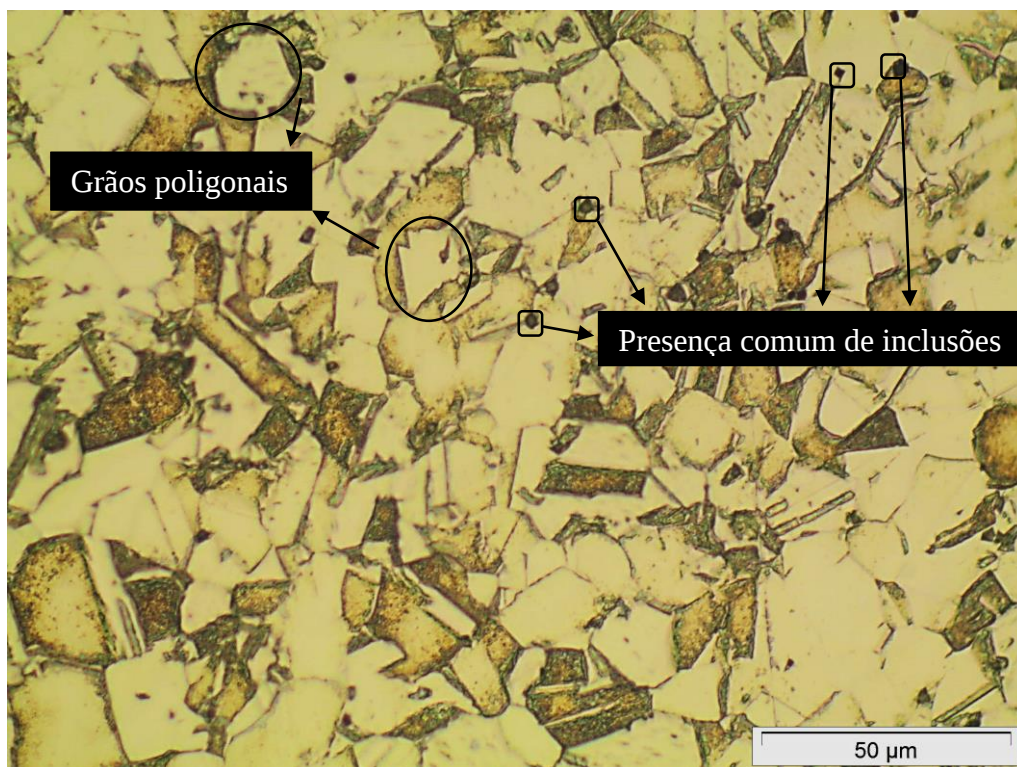
5.1.1 Microscopia

5.1.1.1 Microscópio ótico

Com o microscópio ótico é possível realizar a visualização das deformações sofridas pelo cavaco, e dessa forma relacionar com a matriz do material sem deformação, isto é, o material livre de qualquer deformação, com grãos em sua condição final pós processo de fabricação do tarugo, e no cavaco o a deformação que os grãos sofreram após a etapa de usinagem.

Dessa forma, conforme imagens a seguir é possível avaliar o estado inicial do material (AISI 304) antes dos processos de usinagem, e após esses processos. Na Figura 9, tem-se o a microscopia do aço inox no estado em que foi adquirido.

Figura 9: Aço AISI 304 no forma que foi adquirido (aumento de 500x)

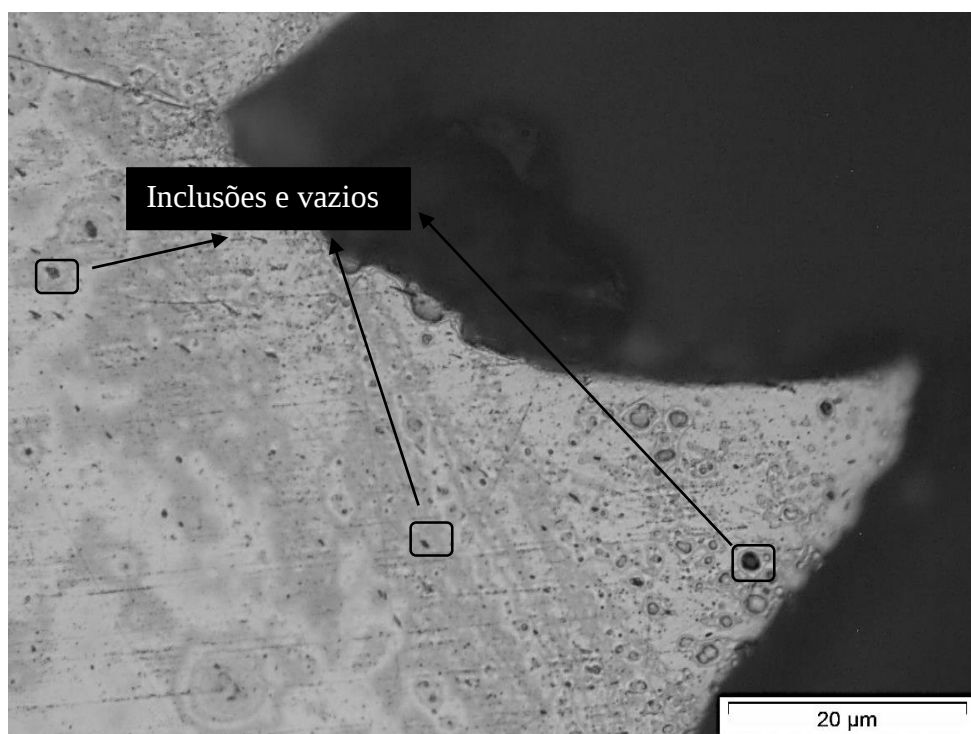


Fonte: Autoria própria.

A partir da Figura 9, e com base nas microscopias realizadas por Colpaert (2008), bem como no handbook de aços inoxidáveis da Outokompu (2013), observa-se estrutura semelhante a aços da série 304 em especial pela geometria poligonal dos grãos e sua distribuição, bem como presença de pequenas inclusões, comuns desse tipo de aço.

Assim, considerando cada um dos processos de usinagem, foi possível obter as Figuras 10 a 18 exibidas a seguir, obtidas a partir do embutimento e metalografia dos cavacos de cada um dos parâmetros utilizados, a partir da observação da seção transversal desses, que demonstram o grau de deformação que o material sofreu, e consequente plastificação.

Figura 10: Amostra 1.1 (aumento de 1000x)



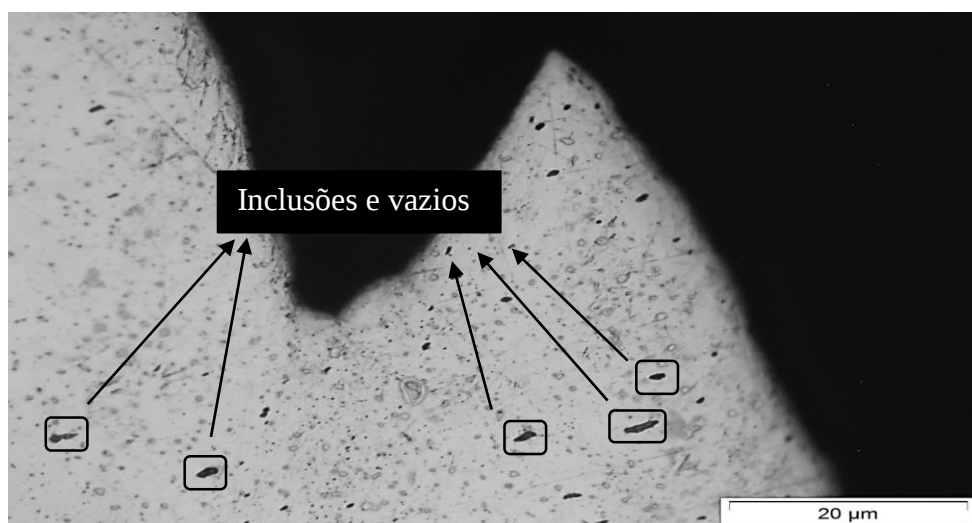
Fonte: Autoria própria.

A partir da Figura 10, percebe-se que mesmo com um aumento de 1000x não existe nenhum contorno de grão visível na microscopia, ou o ataque químico não foi capaz de revelar, constatando que talvez houve alguma transformação com esses, haja vista que o material que era composto por uma quantidade considerável de grãos no mesmo local não mais exibe esses grãos.

Camargo (2008) & Di Schino, Barteri e Kenny (2003) citam que uma elevada deformação plástica promove uma transformação na microestrutura do aço, que como citado possuía contornos de grão visíveis e na após a deformação plástica não foi possível observar.

É exibido na Figura 11 outro parâmetro de usinagem, a amostra 1.2.

Figura 11: Amostra 1.2 (aumento de 1000x)

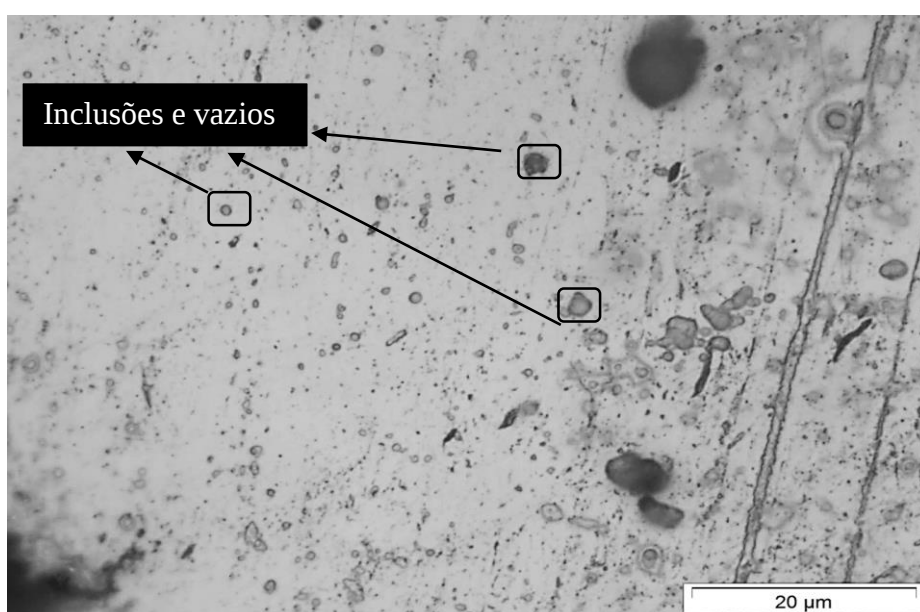


Fonte: autoria própria

Da mesma forma que a amostra 1.1, a amostra 1.2 não exibe contornos de grãos mesmo com aumento de 1000x, que também talvez não tenha sido revelado devido ao ataque químico utilizado, apresentando apenas o que conforme Colpaert (2008) e Outokompu (2013), são inclusões globulares, ou mesmo vazios decorrentes do processo de usinagem ao qual o cavaco foi submetido, ocasionado pelo encruamento e cisalhamento sofridos.

É apresentado na Figura 12 a metalografia da amostra 1.3.

Figura 12: Amostra 1.3 (aumento de 1000x)

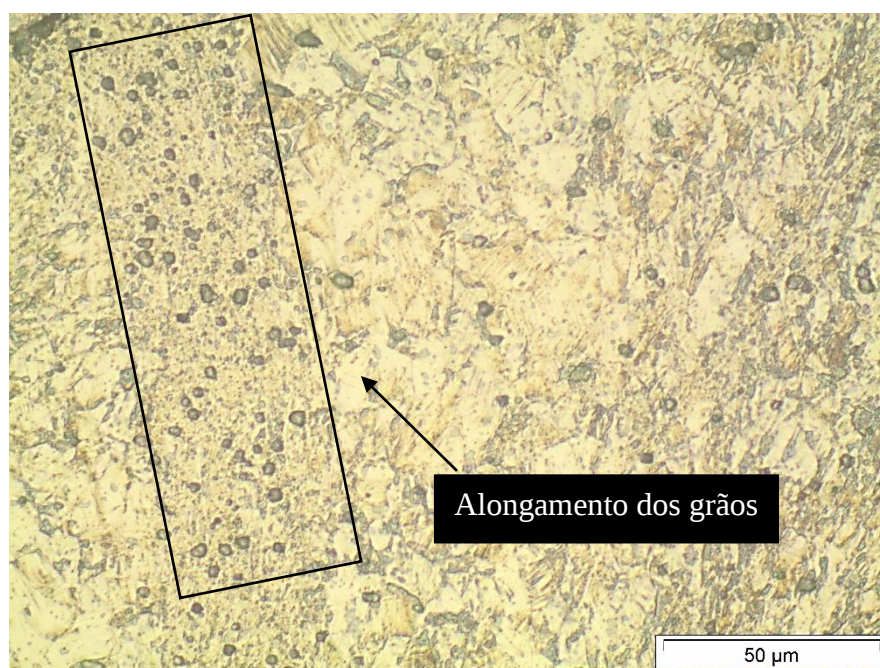


Fonte: Autoria própria.

Finalizando as amostras da série 1, percebe-se que não é possível avaliar o grau de encruamento que o material sofreu, pois, a forma como os grãos não revelados se apresentam na microscopia é inconclusiva quanto a tal, permitindo apenas avaliar que em alguns pontos de cada amostra exibem-se vazios e poros, decorrentes dos processos de lixamento e polimento, bem como dos processos de usinagem.

Já nos procedimentos da série 2, conforme a Figura 13, pode-se observar que já é possível avaliar o grau de encruamento sofrido durante o processo.

Figura 13: Amostra 2.1 (aumento de 1000x)

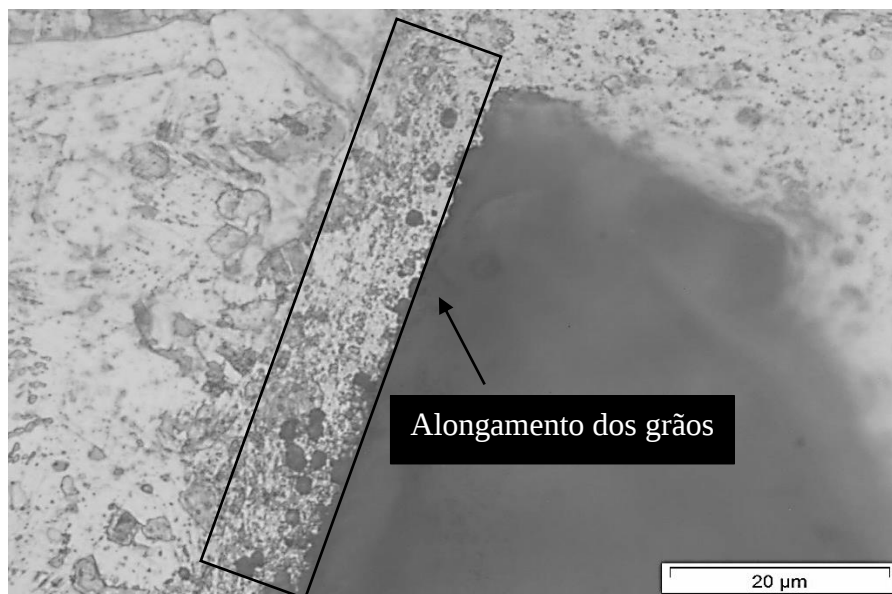


Fonte: Autoria própria.

Comparando a Figura 13 e a Figura 9 é possível observar claramente o cisalhamento existente nos grãos, sua distorção e o surgimento do modelo de carta proposto por Piispanen.

É exibido na Figura 14 a análise microscópica do Parâmetro 2.2.

Figura 14: Amostra 2.2 (aumento de 1000x)

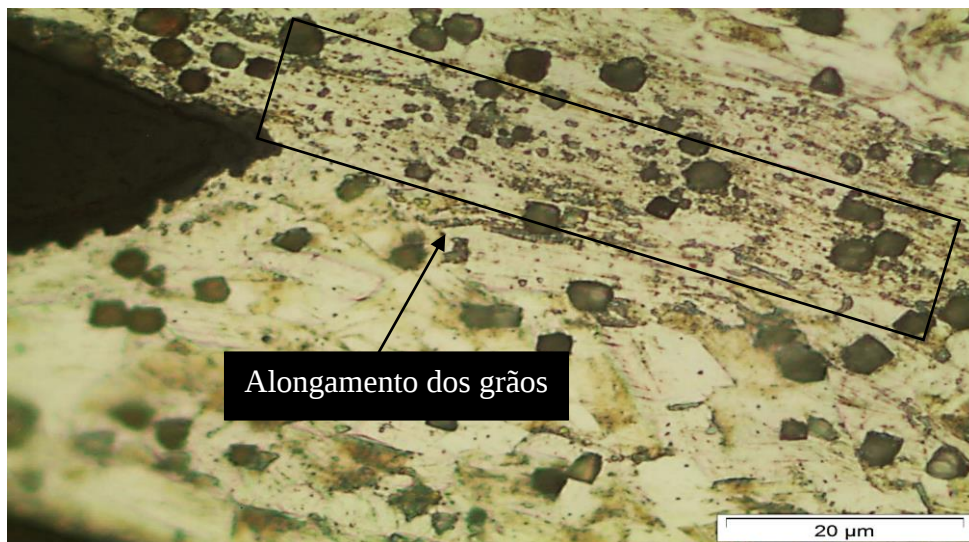


Fonte: Autoria própria

A partir da Figura 14, também é possível observar a deformação sofrida pelos grãos para uma profundidade de corte de 2 mm.

É exibido na Figura 15 a microscopia para o Parâmetro 2.3.

Figura 15: Amostra 2.3 (aumento de 1000x)

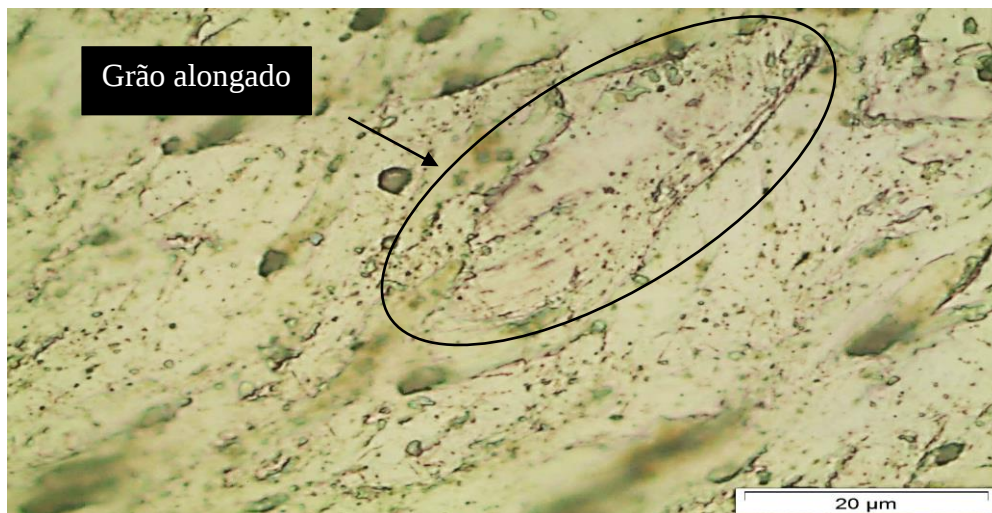


Fonte: Autoria própria.

Da mesma forma que nas amostras 2.1 e 2.2, na 2.3 pode-se observar uma deformação em um dos grãos, bem como vazios decorrentes do processo de usinagem.

Por fim, foi possível chegar as últimas amostras, 3.1, 3.2 e 3.3, sendo primeiro exibido o resultado do parâmetro 3.1 conforme Figura 16.

Figura 16: Amostra 3.1 (aumento de 1000x)



Fonte: Autoria própria.

A partir da Figura 16 percebe-se uma deformação sofrida pelo grão em comparação aos grãos iniciais, exibidos na Figura 9, na qual os grãos possuem geometria bem definida, enquanto que após a usinagem, se alongaram em relação ao tamanho inicial.

É exibido na Figura 17 a microscopia para a amostra 3.2.

Figura 17: Amostra 3.2 (aumento de 1000x)

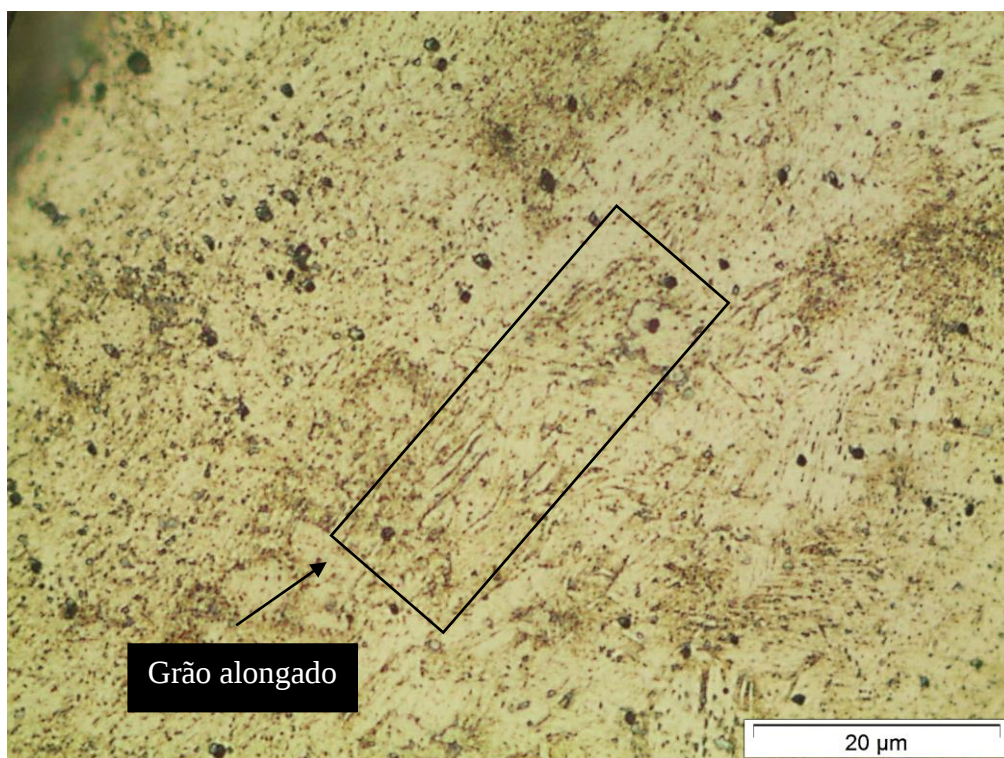


Fonte: Autoria própria.

Percebe-se, diferente das demais imagens obtidas, que para esse procedimento houve pouca deformação nos grãos presentes na microscopia, sendo assim, pode-se considerar que nesses parâmetros de usinagem a deformação sofrida pelo material foi menor quando comparada com as demais amostras.

Por fim, a última variação dos parâmetros nos levou à amostra 3.3, que está representada na Figura 18.

Figura 18: Amostra 3.3 (aumento de 1000x)



Fonte: Autoria própria.

Conforme a Figura 18, foi possível observado que houve um alongamento dos grãos também, mesmo com os parâmetros de maior velocidade de corte de 265 m/min e profundidade de corte de 3 mm, ou seja, a maior velocidade de corte associada a uma profundidade de corte maior não gerou menos deformação no material do que a anterior, 3.2, que gerou o menor grau de deformação avaliável dentre os ensaios realizados.

A partir das observações encontradas nas Figuras 10 a 18, foi possível construir a Tabela 7 que contém todas as informações de forma resumida acerca destas figuras.

Tabela 7: Detalhes observados nas microscopias óticas

Amostra	Características
1.1	Impossível avaliar
1.2	Impossível avaliar
1.3	Impossível avaliar
2.1	Grãos alongados
2.2	Grãos alongados
2.3	Grãos alongados
3.1	Grãos alongados
3.2	Grãos poligonais
3.3	Grãos alongados

Fonte: Autoria própria

5.1.1.2 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura permitiu uma melhor observação dos efeitos que a ferramenta de usinagem sofreu em cada uma das diferentes profundidades de corte. A partir da comparação das imagens obtidas e de artigos científicos com material usinado semelhante, bem como ferramenta, foi possível determinar cada mecanismo de desgaste que a ferramenta sofreu.

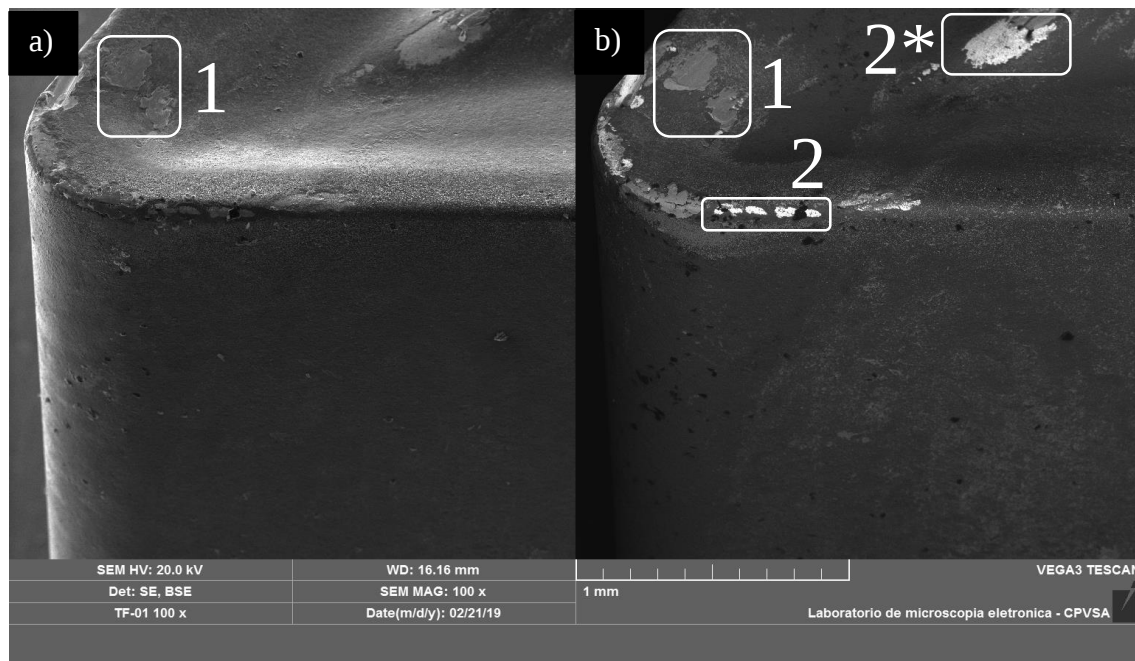
As análises que puderam ser realizadas, restritas às limitações do equipamento, foram de elétrons secundários, que conforme Colpaert (2008) e Dedavid (2007), é a formação de imagem a partir de elétrons de baixa energia, gerando assim imagens de alta resolução, nas quais o contraste da imagem é dado sobretudo pelo relevo da amostra.

Também foram obtidas imagens por elétrons retroespalhados, que Colpaert (2008) e Dedavid (2007) explicam que devido à não reflexão direta desses elétrons emitidos pelo feixe, e escapam da amostra são detectados por um detector em um plano normal ao feixe incidente, e como esse fenômeno é fortemente dependente do número atômico que compõe a amostra, a intensidade do sinal depende desta grandeza.

Assim, conforme as Figuras 19 a 27, será ilustrado o resultado do desgaste observado na ferramenta de corte, com aumentos de 100x, 300x, 500x e 1000x, sendo representado (a) elétrons secundários e (b) elétrons retroespalhados.

É apresentado nas Figuras 19, 20 e 21 a microscopia eletrônica de varredura da aresta utilizada para $A_p=1\text{mm}$, nesse caso, referente as amostras 1.1, 2.1 e 3.1.

Figura 19: Aresta $A_p = 1\text{mm}$, aumento de 100x.



Fonte: Autoria própria.

A partir da Figura 19, na marcação (1) observa-se o que poderia ser uma deformação plástica sofrida pelo material da ferramenta, porém Machado (2011) explica que em ferramentas de metal duro, esse tipo de deformação é muito difícil de ocorrer, ocorrendo a ruptura da ferramenta antes mesmo desse tipo de formação, o que gera o questionamento se o ponto em destaque se trataria de uma adesão de material, conforme Childs, Maekawa, Obikawae e Yamane (2013).

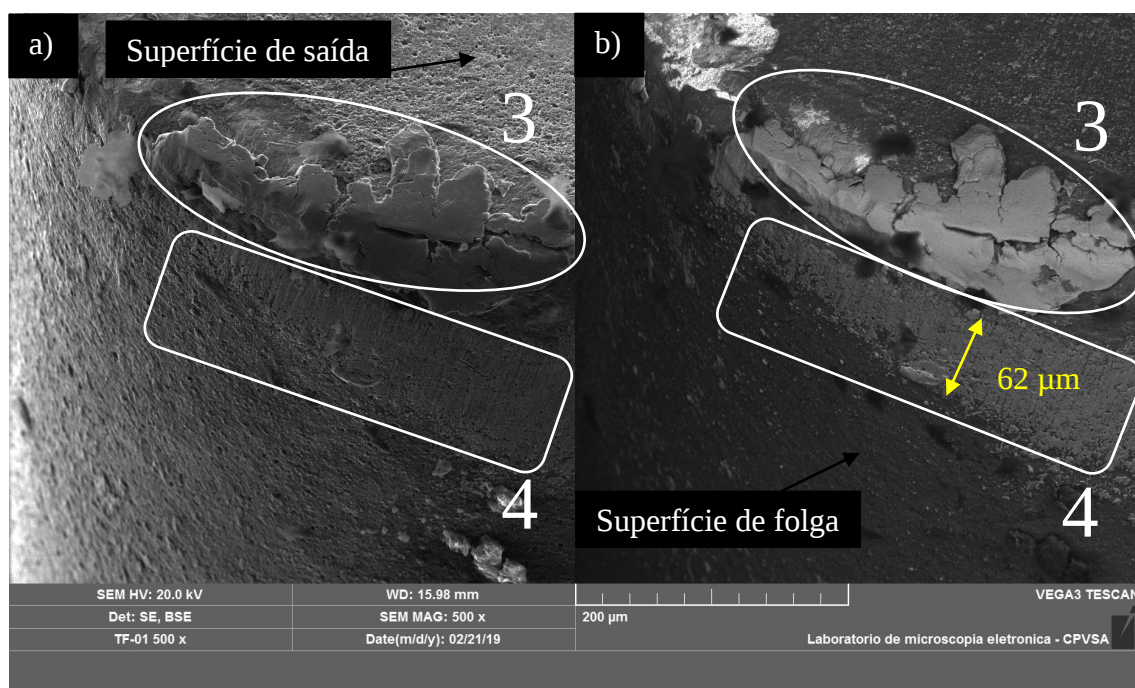
Ainda conforme a Figura 19 pode-se observar pela microscopia que pela detecção BSE (elétrons retroespalhados), a diferença de cor na região (2), que existe de fato diferença de densidade entre o material fora da marcação e dentro dela, caracterizando desgaste por *attrition* sofrido pela ferramenta, conforme Machado (2011), o que promoveu remoção do revestimento de TiAlN da ferramenta expondo sua matriz WC (carbeto de tungstênio). Fato esse confirmado quando avaliado o peso atômico da fase dos elementos envolvidos em todo o processo, que são aço inoxidável, rico em Cr, o revestimento supracitado e o núcleo da ferramenta de corte, C (carbono) e W (tungstênio).

Na região demarcada (2*) tem-se a mesma diferença de cor existente em (2), nesse caso, como se trata da zona de escorregamento do cavaco e não da zona de aderência, trata-se de uma abrasão devido ao atrito excessivo do cavaco com o quebra cavaco da ferramenta.

Conforme tabela periódica, o elemento de maior peso atômico entre os citados é o Tungstênio, com peso atômico de 183,84, contra 51,996 do cromo material mais abundante no aço inox, 47,867 do titânio, 26,982 do alumínio e 14,007 do nitrogênio, contidos no revestimento da ferramenta. Com base nessas informações torna-se claro a diferença de tonalidades onde houve abrasão e *attrition*.

Conforme marcações na Figura 20 e 21, e com base em Krolczyk, Nieslony & Legutko (2014), Marques, Suarez, Sales & Machado (2018) e Corrêa, Schroeter & Machado (2017), tais descrições tratam-se de (4) desgaste de flanco, abrasão, (3) possível deformação plástica.

Figura 20: Aresta $A_p = 1\text{mm}$, aumento de 500x.

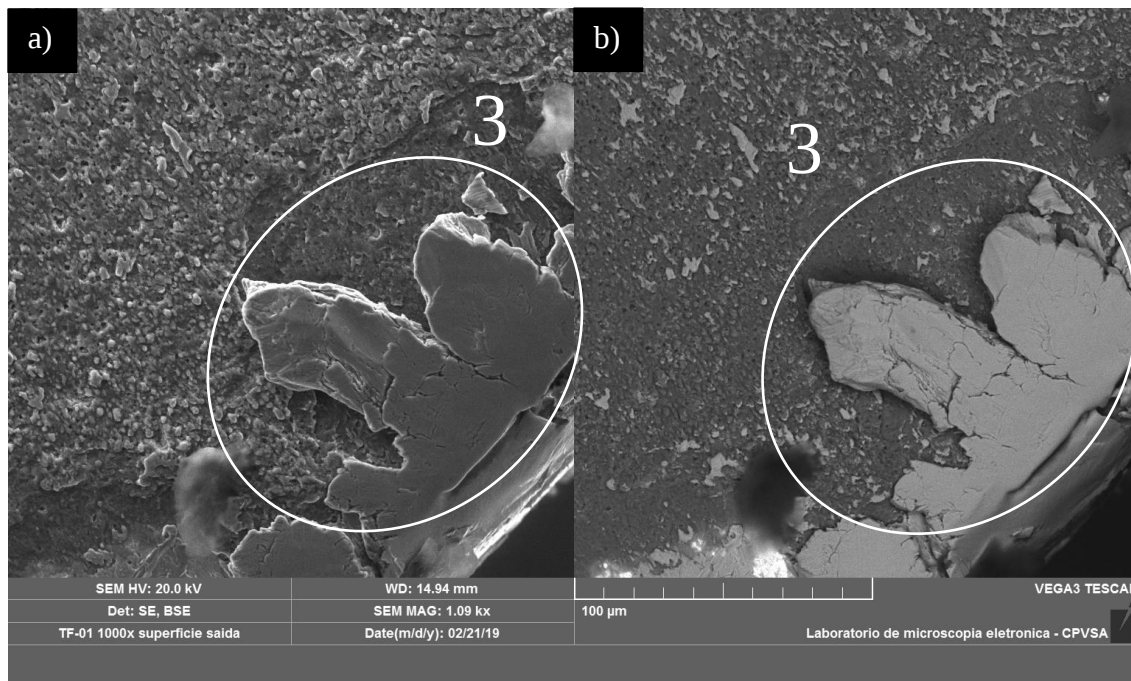


Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, é possível avaliar que se trata de adesão de material da peça de trabalho à ferramenta de corte, conforme Childs, Maekawa, Obikawae e Yamane (2013), que é a solda por pressão do material da peça usinada à ferramenta, que requer altas

temperaturas, e tem alta resistência nessa condição, e aços inox, superligas de Ni e ligas de Ti exibem bem esse mecanismo de desgaste.

Figura 21: Superfície de Saída $A_p = 1\text{mm}$, aumento de 1000x



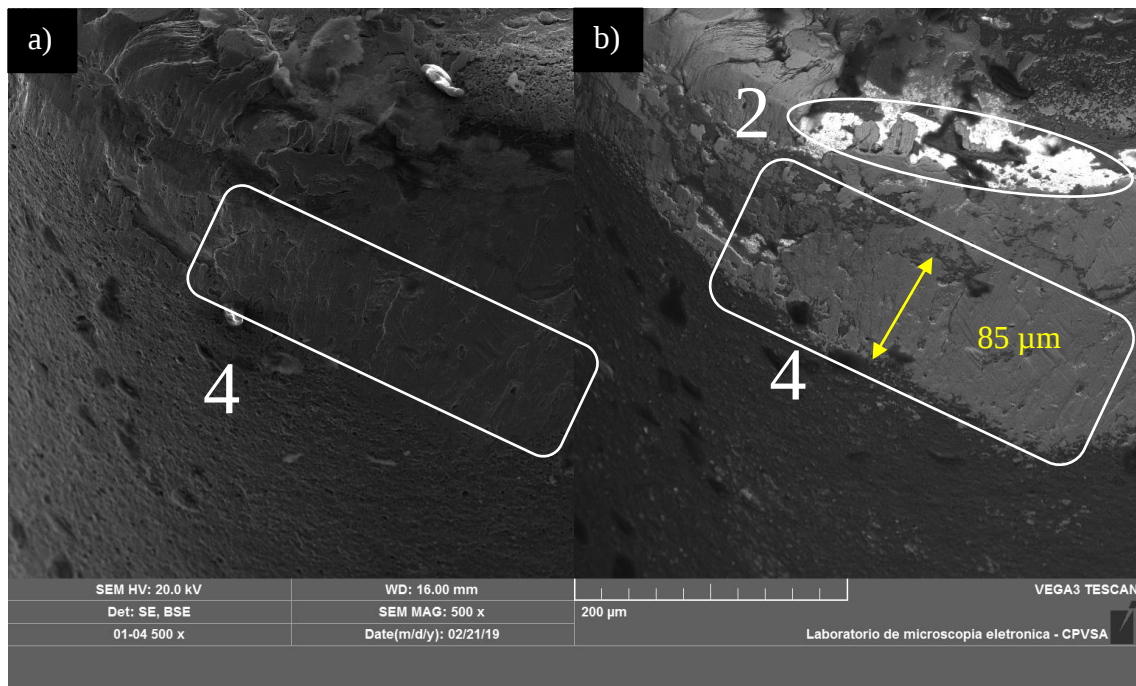
Fonte: Autoria própria.

É exibido na Figura 21 a superfície de saída da ferramenta de corte, percebe-se o mecanismo de adesão do material da peça usinada à ferramenta. A partir da microscopia que pela detecção BSE (elétrons retroespalhados), existe uma diferença de tonalidade entre a região de destaque, mais uma vez a partir do peso atômico dos materiais, a liga usinada rica em cromo possui peso atômico maior que do revestimento da ferramenta, que é uma liga TiAlN, conforme explicado anteriormente.

É apresentado nas Figuras 22, 23 e 24 a microscopia eletrônica de varredura da aresta utilizada para $A_p = 2\text{mm}$, nesse caso, referente aos amostras 1.2, 2.2 e 3.2.

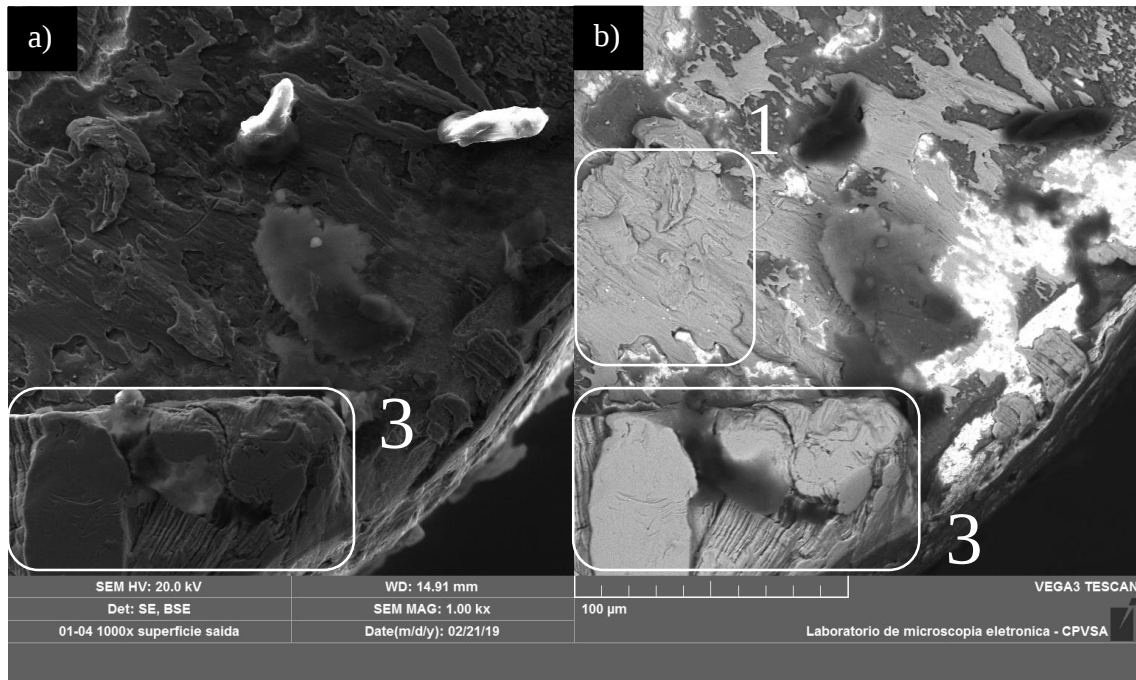
Nestas são observados os mesmos desgastes da aresta utilizada para $A_p = 1\text{ mm}$, mas o desgaste de flanco é mais proeminente, coerente com a profundidade de corte maior.

Figura 23: Aresta $A_p = 2\text{mm}$, aumento de 500x



Fonte Autoria própria.

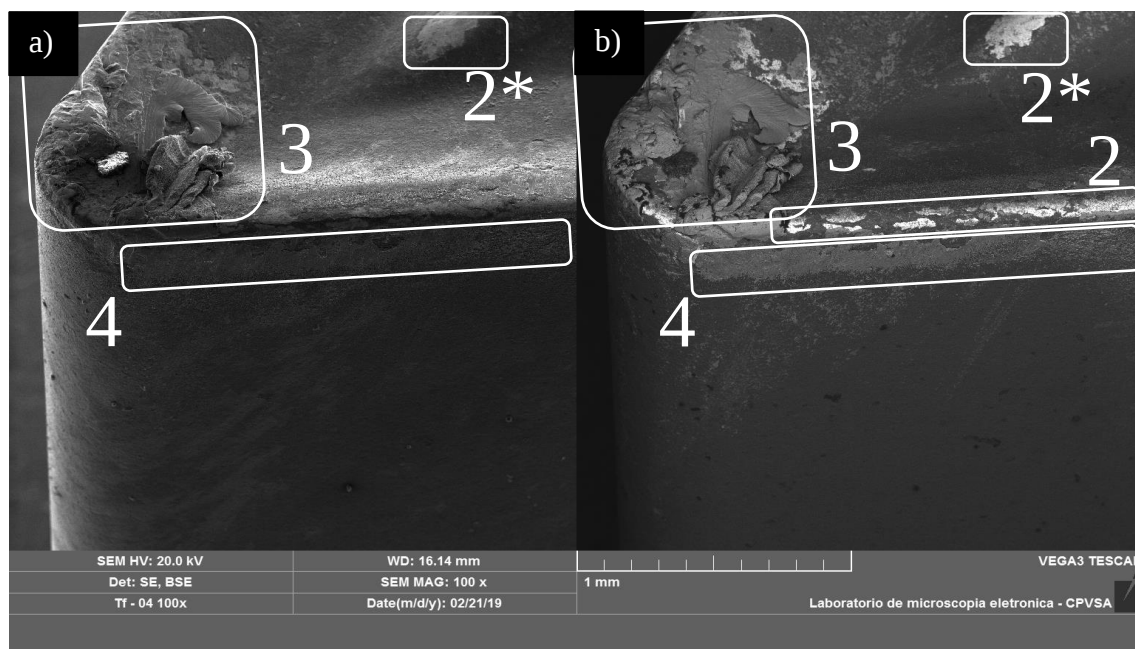
Figura 24: Superfície de saída $A_p = 2\text{mm}$, aumento de 1000x



Fonte: Autoria própria

Por fim, é apresentado nas Figuras 25, 26 e 27 a microscopia eletrônica de varredura da aresta utilizada para $A_p = 3\text{mm}$, nesse caso, referente as amostras 3.1, 3.2 e 3.3.

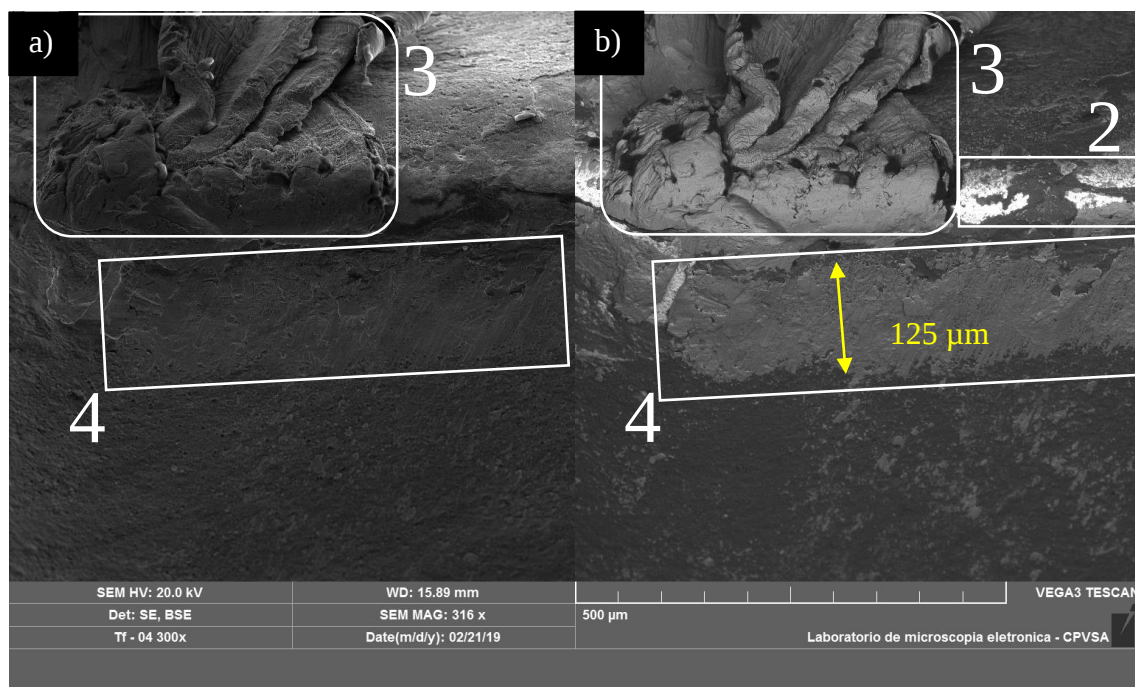
Figura 25: Aresta $A_p = 3\text{mm}$, aumento de 100x



Fonte: Autoria própria.

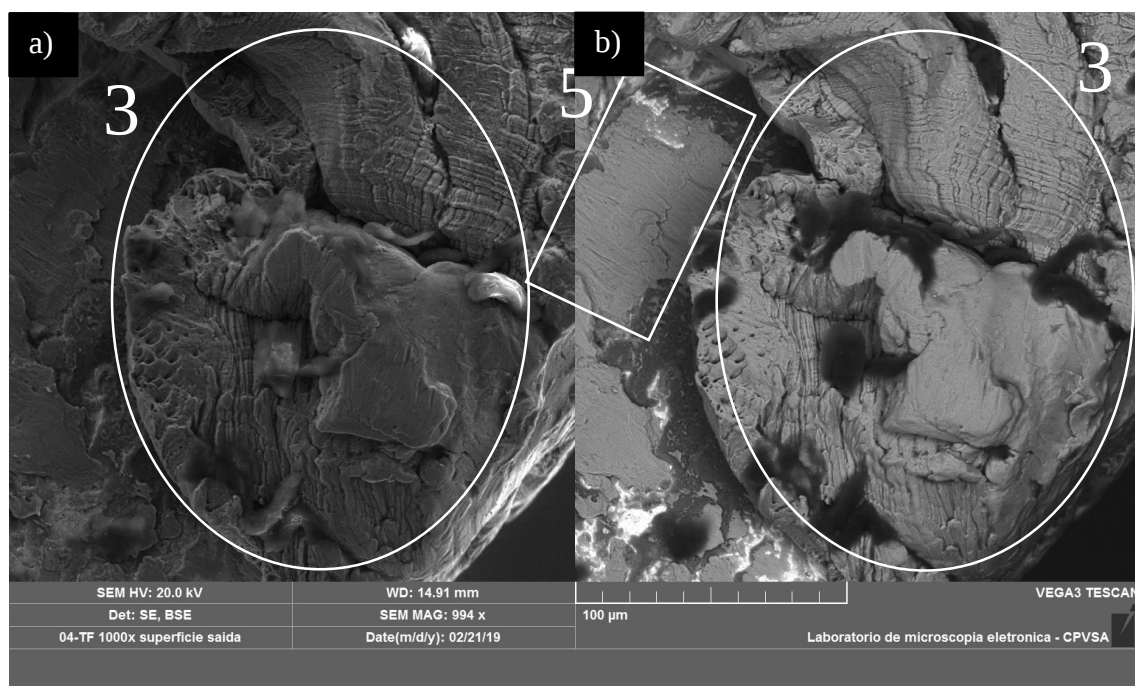
Com base na Figura 25 pode ser observado (2), (3) e (4), *atrittion*, adesão de material da peça usinada e abrasão, respectivamente.

Figura 26: Aresta Ap = 3mm, aumento de 300x



Fonte: Autoria própria.

Figura 27: Superfície de saída Ap = 3mm, aumento de 1000x



Fonte: Autoria própria

Com base nas Figuras 25, 26 e 27, é possível avaliar os mesmos mecanismos de desgaste descritos anteriormente nas outras 2 arestas, sendo evidenciado em (3) uma

adesão de material muito maior na superfície de saída e no flanco, o que pode ser resultado da baixa velocidade de avanço durante a realização da amostra 3.1, no qual a profundidade de corte foi de 3 mm, porém a velocidade de avanço foi de 0,1 mm/rotação.

Assim sendo, é possível avaliar que para uma profundidade de corte de 3 mm, ocorrem os mesmos mecanismos de desgaste nas ferramentas, e à medida que a profundidade aumenta, apenas ocorre maior desgaste, maior adesão de material da peça de trabalho.

Dessa forma, com base nas microscopias do MEV e da análise dos mecanismos de desgaste, foi possível criar a Tabela 8, que apresenta, a partir dos parâmetros de usinagem, que mecanismos de desgaste cada aresta sofreu.

Tabela 8: Mecanismos de desgaste avaliados na ferramenta de corte

Aresta	Material	
	Superfície de folga	Superfície de saída
Ap = 1 mm	Abrasão e attrition	Adesão e attrition
Ap = 2 mm	Abrasão e attrition	Adesão e attrition
Ap = 3 mm	Abrasão e attrition	Adesão e attrition

Fonte: Autoria própria.

5.1.2 Ensaios mecânicos

5.1.2.1 Dureza

O ensaio de dureza realizado obteve um valor médio de dureza de 213,65 HV, conforme Tabela 9, o que é superior ao valor médio encontrado de dureza para o aço AISI 304, que é de ≤ 180 HV conforme Armco (2019). Dessa forma, é necessário compreender qual motivo para divergência desses dados.

Tabela 9: Dados dureza

Material	Dureza Vickers média	Desvio padrão	Confiabilidade (95%)
AISI 304	213,65	15,51	93,64%

Fonte: Autoria própria

Assim, com base em Carneiro (2014), o valor de dureza diferente do esperado se deve ao fato de grãos com presença de martensita, que no seu trabalho, elevaram o valor de dureza Vickers de 174,35 HV nos grãos sem presença de martensita, para 210,68, valor relativamente próximo do valor experimental encontrado nesse trabalho.

Porém, de acordo com Barbosa, Campos & Fonseca (2004), para uma amostra do mesmo aço AISI 304, quando deformado a frio em 20%, a dureza avaliada foi de 218,4 HV.

Dessa forma, considerando o que o que Barbosa, Campos & Fonseca (2004) e Carneiro (2014) avaliaram, e com base na microscopia obtida do material utilizado nesse trabalho, pode-se considerar que a deformação plástica é mais plausível que a formação de martensita.

5.1.3 Rugosidade

Cada um dos parâmetros utilizados para realização de usinagem deixou um acabamento superficial no tarugo, que após análise de rugosidade resultou nos valores exibidos na Tabela 10, que contempla os valores de rugosidade medidos, a média e o desvio padrão de cada etapa.

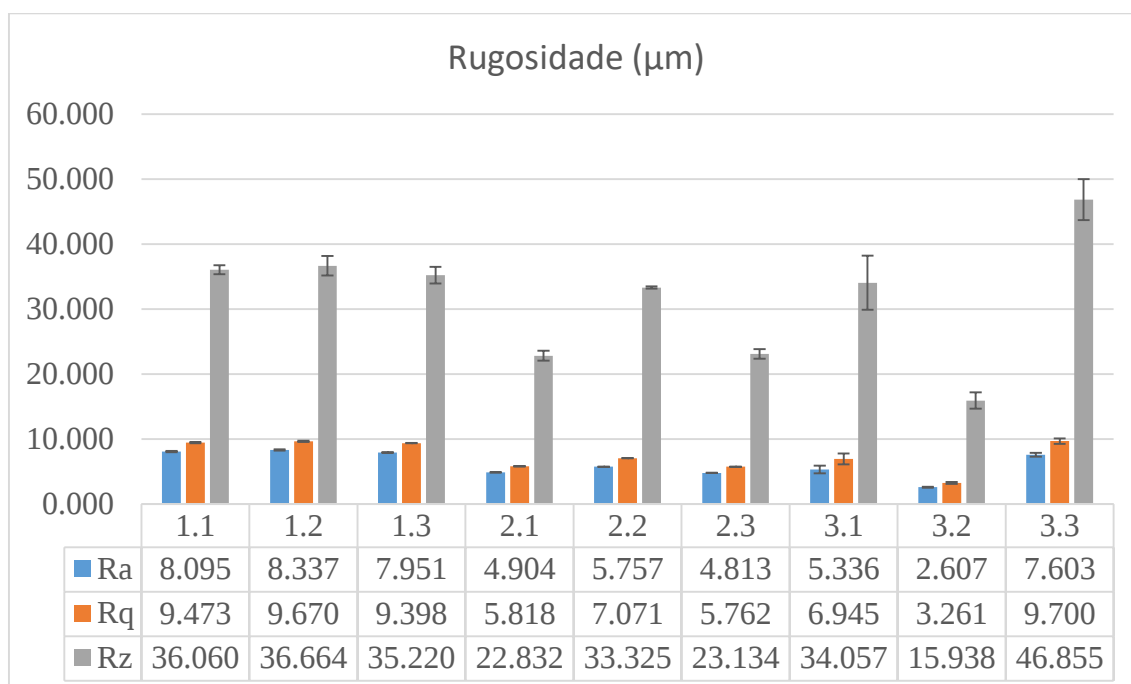
Tabela 10: Valores e Padrões de rugosidade encontrados

Amostra	Medida	Medidas encontradas			Média	Desvio Padrão
1.1	Ra	8,106	7,982	8,196	8,095	0,107
	Rq	9,575	9,343	9,502	9,473	0,119
	Rz	36,284	36,621	35,275	36,060	0,700
1.2	Ra	8,414	8,394	8,202	8,336	0,117
	Rq	9,788	9,566	9,657	9,670	0,111
	Rz	38,14	36,707	35,144	36,663	1,498
1.3	Ra	7,955	7,956	7,941	7,950	0,008
	Rq	9,416	9,359	9,42	9,398	0,034
	Rz	36,501	33,923	35,237	35,220	1,289
2.1	Ra	4,934	4,926	4,852	4,904	0,045
	Rq	5,86	5,842	5,753	5,818	0,058
	Rz	23,148	23,381	21,968	22,832	0,757
2.2	Ra	5,741	5,787	5,742	5,757	0,0263
	Rq	7,056	7,109	7,049	7,071	0,033
	Rz	33,429	33,425	33,12	33,325	0,177
2.3	Ra	4,822	4,795	4,823	4,813	0,0159
	Rq	5,733	5,75	5,804	5,762	0,037
	Rz	22,464	23,016	23,923	23,134	0,737
3.1	Ra	5,711	4,676	5,622	5,336	0,574
	Rq	7,285	5,995	7,554	6,945	0,833
	Rz	33,565	30,16	38,446	34,057	4,165
3.2	Ra	2,638	2,655	2,529	2,607	0,068
	Rq	3,379	3,298	3,107	3,261	0,140
	Rz	17,074	16,162	14,577	15,938	1,263
3.3	Ra	7,31	7,603	7,897	7,603	0,293
	Rq	9,295	9,673	10,131	9,670	0,419
	Rz	43,762	46,742	50,061	46,855	3,151

Fonte: Autoria própria

A partir da Tabela 10, foi possível gerar o gráfico representado pela Figura 29, que possui todos os valores médios de rugosidade associado a seus respectivos desvios padrão.

Figura 28: Valores de rugosidade obtidos



Fonte: Autoria própria

Considerando os valores médios encontrados de rugosidade, e o padrão de classe de rugosidade para a rugosidade Ra, conforme a Tabela 10, pode-se comparar com a Tabela 11, e assim avaliar a qualidade de acabamento deixada por cada condição pré-definida de usinagem.

Tabela 11: Tabela de rugosidade ABNT

Classe de rugosidade	Desvio médio aritmético (Ra) μm
N 9	6,3
N 8	3,2
N 7	1,6

Fonte: Adaptado NBR 8404, (1984)

Assim, considerando a Tabela 10 e a Tabela 11 é possível verificar que a qualidade de usinagem obtida para as amostras 1.1, 1.2 e 1.3, no qual a profundidade de corte foi de 1 mm, se encaixa na Classe N9, que atende valores de rugosidade entre 6,3 e 12,5 μm . As amostras CNC 2.1, 2.2 e 2.3 também se enquadraram na Classe N9, pois a média deles está entre 4,8 e 5,7 μm (menor que 6,3 μm e maior que 3,2, da Classe N8). Por fim, as

amostras 3.1 e 3.3 também se enquadram na Classe N9, mas o parâmetro CNC 3.2 com rugosidade média de $2,6 \mu\text{m}$ se enquadrou na Classe N7 ($1,6 \mu\text{m} \leq \text{Ra} \leq 3,2 \mu\text{m}$).

Tendo isso em vista, pode-se afirmar claramente que para melhor acabamento superficial, o padrão da amostra 3.2 possui o menor valor de Ra, o que garante que a qualidade de acabamento nesse padrão de usinagem é o que garante melhor acabamento superficial.

A rugosidade Rq é utilizada geralmente para componentes eletrônicos e óticos, dessa forma, o problema principal que ela apresenta é que não detecta diferenças de espaçamento ou a presença não frequente de picos altos e vales profundos, mas tem a vantagem de acentuar valores do perfil que se afastam da média.

Já a rugosidade Rz correspondente à média de 5 valores de rugosidade parcial, é utilizada em superfícies periódicas e conhecidas, onde pontos isolados não afetam sua função, e assim informa muito bem superfícies periódicas, mas nem todos rugosímetro medem, bem como não informa o formato da superfície ou o espaçamento das rugosidades.

Associado a esses resultados de rugosidade, e com base no avaliado quanto a deformação plástica sofrida pelo material na análise microscópica do cavaco, pode-se considerar que esse parâmetro é o que gera menor deformação plástica na ferramenta, ou seja, mesmo sendo um procedimento com profundidade de corte intermediária bem como velocidade de avanço também intermediária, é o parâmetro dentre os testados que melhor se comporta quanto a deformação plástica do material utilizado, bem como da ferramenta de corte, conforme análises microscópicas no MEV demonstraram quanto aos mecanismos de desgaste sofridos pela ferramenta em cada um dos procedimentos.

5.2 ENSAIO DE USINAGEM

Considerando os parâmetros já explicados sobre os parâmetros seguidos e os resultados, foi construída a Tabela 12, que apresenta os dados com tipo de cavaco, forma e a rugosidade superficial que cada etapa de usinagem gerou, avaliando através da rugosidade qual melhor acabamento e qual melhor forma de cavaco obtido, considerando os problemas que a forma do cavaco tem e seus riscos.

Tabela 12: Classificação e propriedades dos cavacos obtidos

Amostra	Tipo	Forma	Rugosidade (Ra) da superfície da amostra
1.1	Cisalhamento	Lascas	8,095
1.2	Cisalhamento	Lascas	8,336
1.3	Contínuo	Espiral/Fita	7,950
2.1	Cisalhamento	Lascas	4,904
2.2	Cisalhamento/Contínuo	Espiral/Lascas	5,757
2.3	Contínuo	Em fita	4,813
3.1	Cisalhamento	Lascas	5,336
3.2	Cisalhamento/Contínuo	Lascas	2,607
3.3	Contínuo	Em fita	7,603

Fonte: Autoria própria

Com base na Tabela 12, é possível avaliar que o tipo e a forma do cavaco estão ligados à profundidade de corte e à velocidade de avanço, que influenciam diretamente no tempo que a ferramenta de corte estará em contato com o cavaco e com a peça usinada.

O cavaco contínuo se formou quando a profundidade de corte era de 3 mm, dessa forma, independente da velocidade de avanço ou velocidade de rotação da peça usinada sempre se forma cavaco contínuo. Em todos os casos na forma de fita.

As amostras 3.2 e 2.2 geraram em determinados momentos cavacos contínuos, mas também de cisalhamento, gerando formas de lascas ou espiral e lascas.

Todos os demais ensaios geraram cavacos do tipo cisalhamento e em forma de lascas. Assim, relacionando a rugosidade e o tipo de cavaco produzido pode ser avaliado que os cavacos contínuos em geral geram rugosidade maior que os cavacos em formas de lascas.

6 CONCLUSÃO

- A ferramenta utilizada realizou os ensaios dentro da forma esperada, apesar de apresentar em alguns casos deformação plástica excessiva;
- O aço inoxidável austenítico permitiu boa análise da microscopia antes e depois dos processos de usinagem realizados em cada um dos ensaios;
- Dentre os parâmetros avaliados, é possível perceber que o desgaste por abrasão na superfície de folga da ferramenta de usinagem foi proporcional a profundidade de corte utilizada, além do desgaste sofrido também ter sido proporcional.
- No parâmetro 3.2, a rugosidade obtida foi a menor dentre todos os parâmetros. Também gerou o tipo e forma de cavaco obtidos mais convenientes. E na microscopia do cavaco para esse parâmetro, os grãos estavam com tamanho muito próximos ao do metal antes de sofrer qualquer deformação plástica, provando que houve pouca ou nenhuma deformação plástica.
- A microscopia eletrônica de varredura da aresta que foi utilizada na amostra 3.2 também foi utilizada nas amostras 3.1 e 3.3, não podendo gerar conclusões sobre seu desgaste sem antes realizar um ensaio para verificação disto.

REFERÊNCIAS

- ARMCO – **Aços Inoxidáveis especificações técnicas**. Disponível em: <http://www.armco.com.br/wp/wp-content/uploads/2011/09/AcosInoxidaveis_especificacoestecnicas.pdf>. Acesso em 04/03/2019.
- ASTAKHOV, V. P. **Geometry of Single-point Turning Tools and Drills – Fundamentals and Practical Applications**. Cardiff – UK: Springer, 2010.
- BARBOSA, P. A. **Estudo do comportamento mecânico na usinagem de aços inoxidáveis**. 2014. 234p. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- BARBOSA, R. P., CAMPOS, S. G. S., FONSECA, M. A. **Recristalização de um aço Inoxidável Austenítico/Uma abordagem estatística**. Revista on-line Unileste. N° 2. 2004. Disponível em: <https://www.unileste.edu.br/revistaonline/volumes/02/downloads/artigo_13.pdf>. Acesso em 04/03/2019.
- CAMARGO, R. de. **Verificação da usinabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos através do processo de furação**. 2008. 100p. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.
- CARNEIRO, C. H. L., **Avaliação do grau de sensitização do aço aisi 304 pelo método dl-epr de uma junta soldada com o processo tandem gmaw**. 2014. 100p. Monografia (Engenharia metalúrgica) – Escola Politécnica UFRJ. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10009930.pdf>> Acesso em 04/03/2019.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 6. ed., ABM, 1988.
- CHILDS, T., MAEKAWA, K., OBIKAWAE, T., YAMANE, Y., **Metal Machining Theory and Applications**. John Wiley & Sons Inc. New York. 2013.
- CORRÊA, J., SCHOROETER, R., MACHADO, Á., **Tool life and wear mechanism analysis of carbide tools used in the machining of martensitic and supermartensitic stainless steels**. Tribology International, Vol 105. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.09.035>>. Acesso em 18/02/2019.
- DEDAVID, B. A. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.
- DI SCHINO, A., BARTERI, M., K, J. 2003. **Effects of grain size on the properties of a low nickel austenitic stainless steel**. Journal of Materials Science. 38. 4725-4733. 10.1023/A:1027470917858. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/227105187_Effects_of_grain_size_on_the_properties_of_a_low_nickel_austenitic_stainless_steel>. Acesso em 07/03/2019.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: MM editora, 2002.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Carlos: Editora Edgard Blücher LTDA, 2003.

KALPAKJIAN, S., SCHMID, S. R., **MANUFACTURING – Engineering and Technology**. 7th ed. Singapore: Pearson, 2014.

KÖNIG, W., KLINGER, M., LINK, R. **Machining Hard Materials with Geometrically Defined Cutting Edges - Field of Applications and Limitations. Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren, WZL, RWTH Aachen/Federal Republic of Germany**, 1990.

KROLCZYK, G., NIESLONY, P. LEGUTKO, S., **Determination of tool life and research wear during duplex stainless steel turnig**. Archivies of Civil and Mechanical Engineering, Vol 15. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2014.05.001>>. Acesso em 18/02/2019.

MACHADO, Á. R., **Teoria da usinagem dos materiais**. 2^a ed. São Paulo: Blucher, 2011.

MARQUES, A., SUAREZ, M., SALES, W., MACHADO, Á., **Turning of Inconel 718 with whisker-reinforced ceramic tools applying vegetablebased cutting fluidmixedwith solid lubricants byMQL**, Journal of Materials Processing Tech. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.11.032>>. Acesso em 18/02/2019.

OLIVEIRA JR., G. G. **Fatores metalúrgicos que condicionam a usinabilidade das ligas de alumínio**. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 42. Salvador – BA, v. 4, p. 203-216, outubro de 1987.

OUTOKUMPU. **Handbook of stainless steel**. 2013. Disponível em <<https://www.outokumpu.com/choose-stainless/stainless-basics/handbooks>>. Acesso em 07/03/2019

RODRIGUES, M. A. **Caminhos da Usinagem**. São Paulo: Artliber, 2015.

TESSLER, M. B., BARBOSA, C. A. **A usinabilidade dos aços inoxidáveis**. Metalurgia e Materiais - ABM, v. 49, n. 413, p. 32-41, janeiro de 1993.

APÊNDICE

Amostras 1.1, 1.2 e 1.3

Figura 1: Cavacos obtidos pelo amostra 1.1



Figura 2: Cavacos amostra 1.2



Figura 3: Cavacos amostra 1.3



Amostras 2.1, 2.2 e 2.3 respectivamente

Figura 4: Cavacos amostra 2.1



Figura 5: cavacos amostra 2.2



Figura 6: Cavacos amostra 2.3



Amostras 3.1, 3.2 e 3.3 respectivamente

Figura 7: cavacos amostra 3.1



Figura 8: cavacos amostra 3.2



Figura 9: cavacos amostra 3.3

