

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

HEZRY DOS SANTOS GOMES

ENSAIO DE USINABILIDADE A SECO DA LIGA INCONEL 718

Alegrete

2018

HEZRY DOS SANTOS GOMES

ENSAIO DE USINABILIDADE A SECO DA LIGA INCONEL 718

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **bacharel em Engenharia Mecânica**.

Orientador: Prof. Aldoni Gabriel Wiedenhof
Co-orientador: Prof. Ana Claudia Costa de Oliveira

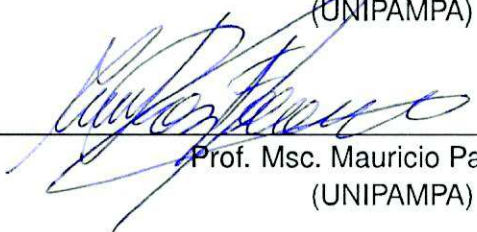
Alegrete

2018

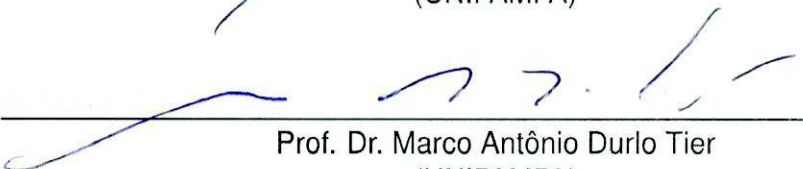
Trabalho de Conclusão de Curso defendida e aprovada em: 28 de junho de 2018.
Banca examinadora:



Prof. Dr. Aldoni Gabriel Wiedenhoft
Orientador
(UNIPAMPA)



Prof. Msc. Mauricio Paz França
(UNIPAMPA)



Prof. Dr. Marco Antônio Durlo Tier
(UNIPAMPA)

©2018

Todos os direitos autorais reservados a Hezry dos Santos Gomes. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

End. Eletr.: hezrygomes@gmail.com

HEZRY DOS SANTOS GOMES

ENSAIO DE USINABILIDADE A SECO DA LIGA INCONEL 718

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **bacharel em Engenharia Mecânica**.

Área de concentração: Usinagem

Trabalho de Conclusão de Curso defendida e aprovada em: 28 de junho de 2018.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Aldoni Gabriel Wiedenhof
Orientador
(UNIPAMPA)

Prof. Msc. Mauricio Paz França
(UNIPAMPA)

Prof. Dr. Marco Antônio Durlo Tier
(UNIPAMPA)

Dedico este trabalho à minha mãe, Rozane, ao meu pai, Romario, ao meu irmão Hezer, as minhas avós, Clecy e Sueli e a minha namorada Cassieli

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por estar vivo e chegar até aqui. Agradeço de forma especial e carinhosa aos meus pais, Romario e Rozane, pelo amor, incentivo, pelo imenso esforço, crédito, determinação e luta na minha formação. Aos meu Irmão Hezer por sempre estar comigo nos momentos bons e ruins dessa formação e a minha namorada Cassieli por estar comigo durante toda essa caminhada, me incentivando e dando motivação para não desistir mesmo quando tudo parecia perdido. A esta universidade, seu corpo docente, administração e sua direção, que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte melhor, contaminado pela confiança no mérito e ética aqui presente. Ao meu orientadore Msc. Aldoni Gabriel Wiedenhof, por ter me dado a oportunidade dessa pesquisa e pelo seu atencioso atendimento sempre que preciso. A minha Coorientadora Dra. Ana Claudia Costa de Oliveira, pela atenção e dedicação, pois sem ela nada disso seria possível. Aos meus colegas e amigos, Eduardo Porto, Enrique Leal, Vagner Lima e Vitor Godoy, e tantos outros, que se fosse escrever aqui não caberia na página, a todos vocês o meu muito obrigado pela ajuda prestada em toda graduação, tanto dentro, quanto fora da universidade, sem vocês a caminhada não seria possível. A todos que direta ou indiretamente contribuíram para minha formação, como graduando ou como ser humano, meu muito obrigado. Por fim, agradeço em especial aos meus pais, pois sem vocês nada disso seria possível, estiveram comigo me dando apoio sempre e a todo o momento, sem criticar, apenas incentivando e dando moral, e isso foi determinante durante toda essa difícil caminhada. Muito Obrigado.

“Confie no SENHOR de todo seu coração e não se apoie na sua própria inteligência. Lembre de Deus em tudo que fizer e ele lhe mostrará o caminho certo”.

Provérbios 3: 5-6

RESUMO

As superligas de níquel são conhecidos pela difícil usinagem, pois possuem propriedades específicas como alta dureza, alta resistência a altas temperaturas, alta resistência a fadiga, e à fluência, e uma ótima resistência a oxidação. Isso torna estas ligas recomendadas para utilização em ambientes de altas temperaturas, como por exemplo no setor aeroespacial e petroquímico. Entretanto, estas características se tornam um problema quando se tenta usinar uma liga com esses parâmetros, pois a usinagem gera calor na zona de fluxo, implicando diretamente no desgaste da ferramenta de corte. Neste contexto torna-se crescente a utilização das superligas de níquel como o Inconel 718, necessitando assim um estudo de ferramentas e técnicas para melhorar a usinagem deste tipo de material. Este trabalho tem como objetivo desenvolver o estudo da usinagem (a seco) por torneamento da liga à base de Inconel 718, com objetivo de verificar a rugosidade no corpo de prova e os desgastes das ferramentas de corte. Os ensaios foram realizados com duas ferramentas de metal duro, uma ferramenta revestida à base de Titânio e a outra sem revestimento, variando a velocidade de corte com avanço fixo, igualmente entre elas e analisando rugosidade do corpo de prova e desgastes das ferramentas.

Palavras-chave: Usinagem, Superligas de Níquel, Inconel 718, Ferramentas Metal Duro

ABSTRACT

The components resulting from nickel superalloys are known for machining high temperatures, high fatigue and creep resistance and high oxidation resistance. This link is used to use in environments from high temperatures, such as in the aerospace and petrochemical sector. However, these become a problem when using a key with the following parameter, because a machining generates heat in the flow zone, directly implying the use of the cutting tool. In this context, the use of nickel superalloys such as Inconel 718 is growing, requiring a study of tools and techniques to improve the machining of this type of material. This work aimed to develop the process of sizing the Inconel 718 database, in order to verify the performance of its cutting tools. The labels were made with two carbide tools, varying the speed of the cut and the fixed arrival between them and analyzing the results.

Keywords: Machining, Nickel Superalloys, Inconel 718, Hard Metal Tools

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Força de usinagem e suas componentes na operação de torneamento	16
Figura 2 – Composição química da liga 718 - API (UNSN07718)	20
Figura 3 – Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte	24
Figura 4 – Mecanismos de desgaste que ocorrem nas ferramentas de corte	24
Figura 5 – Torno CNC utilizado nos ensaios	27
Figura 6 – Microscópio Óptico	28
Figura 7 – Rugosímetro utilizado nos ensaios	28
Figura 8 – Porcentagem de composição do inconel 718	29
Figura 9 – Incerto metal duro revestido e não revestido, respectivamente.	29
Figura 10 – Corpo de prova Liga Inconel 718	31
Figura 11 – Ferramenta TNMG 160404 nn Dc100 com velocidade de (100 <i>m/mim</i>) .	33
Figura 12 – Figura de corte 1, rompida	33
Figura 13 – Figura de corte 2	34
Figura 14 – Ferramenta TNMG 160404 nn Dc100 (200 <i>m/mim</i>)	34
Figura 15 – Ferramenta de corte a 200 <i>m/mim</i>	35
Figura 16 – Ferramenta TNMG 160404 nn Dc100 (200 <i>m/mim</i>)	35
Figura 17 – Ferramenta de corte a 300 <i>m/mim</i>	36
Figura 18 – Ferramenta TNMG 160404 nn Dc100 - Comparação entre as velocidades de corte	37
Figura 19 – Ferramenta TNMG 160404-ha Pc9030 (100 <i>m/mim</i>)	38
Figura 20 – Desgaste da ferramenta de corte a 100 <i>m/mim</i>	38
Figura 21 – Ferramenta TNMG 160404-ha Pc9030 (200 <i>m/mim</i>)	39
Figura 22 – Desgaste da ferramenta de corte a 200 <i>m/mim</i>	39
Figura 23 – Ferramenta TNMG 160404-ha Pc9030 (300 <i>m/mim</i>)	40
Figura 24 – Desgaste da ferramenta de corte a 300 <i>m/mim</i>	40
Figura 25 – Valores das medições de rugosidade	41
Figura 26 – Comparativo das rugosidades dos corpos de prova - 100 <i>m/mim</i> , 200 <i>m/mim</i> e 300 <i>m/mim</i>	42

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIGLAS

a.C – Antes de Cristo

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al – Alumínio

B – Boro

C – Carbono

Co – Cobalto

Cr – Cromo

Cu – Cobre

D – Diâmetro

Fe – Ferro

ft/min – Pés por minuto

Kw – Kilowatts

L – Comprimento a ser torneado

m – Metros

m/min – Metros por Minuto

Mg – Magnésio

mm – Milímetros

Mn – Manganês

Mo – Molibdénio

MPa – Mega Pascal

Nb – Nióbio

Ni – Níquel

P – Fósforo

Pb – Chumbo

R_a - Rugosidade média

RPM – Rotações por minuto

R_t - Rugosidade total

R_y - Rugosidade máxima

S – Enxofre

Si – Silício

Ta – Tântalo

TCC – Tetragonal de Corpo Centrado

Ti - Titânio

V - Vanádio

W – Tungstênio

Z_n - Zircônio

μm – Micrômetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivos específicos	14
1.2	Escopo do trabalho	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Usinagem	15
2.2	Geometria das ferramentas de corte	16
2.2.1	Usinabilidade	16
2.2.2	Usinagem a seco	17
2.2.3	Lubrificação e Refrigeração em Usinagem	17
2.3	Superligas de Níquel	18
2.3.1	Estruturas e Microestruturas	18
2.3.2	Aplicações das Ligas de Níquel	19
2.4	INCONEL 718	19
2.4.1	Usinagem de Superliga de Níquel	21
2.4.2	Materiais e ferramentas utilizados na usinagem das superligas de Níquel	22
2.4.3	Tipo de desgaste das ferramentas de corte	23
2.4.4	Ferramentas para usinagem do Inconel	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	Equipamentos	27
3.1.1	Máquina-Ferramenta	27
3.1.2	Microscópio Óptico	28
3.1.3	Rugosímetro	28
3.1.4	Corpo de Prova	29
3.1.5	Ferramentas	29
4	METODOLOGIA	30
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1	Ferramenta TNMG 160404 nn Dc100	32
5.2	Ferramenta TNMG 160404-ha Pc9030	37
6	CONCLUSÃO	43
6.1	Sugestões Para Trabalhos Futuros	43
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1 INTRODUÇÃO

A importância dos materiais não ferrosos na indústria está em crescimento, e isso acelera a necessidade de um conhecimento mais profundo das particularidades do processamento destes materiais. Seguindo essa linha de pesquisa, as superligas de níquel destacam-se, pois combinam boa resistência à fadiga e à fluência, como rigidez e ductilidade. Estas características fazem com que estas ligas trabalhem em ambientes com temperaturas acima de 500° C. As superligas à base de níquel possuem um papel importante na indústria automobilística, marítima e aeronáutica, dentre outras. Entretanto a usinagem das superligas torna-se difícil devido as suas propriedades somadas à baixa condutividade térmica e à alta afinidade química com muitos materiais de ferramentas de corte. Por este motivo, normalmente a usinagem dessas ligas é realizada a baixas velocidades de corte, comparadas com os aços em geral (KITAGAWA; KUBO; MAEKAWA, 1997).

Assim como as superligas à base de níquel apresentam baixa usinabilidade devido às suas propriedades, a superfície é facilmente afetada ou até mesmo danificada durante as operações de usinagem. Para minimizar os efeitos da usinagem sobre a integridade superficial das peças usinadas, deve-se tomar um cuidado especial na escolha das condições de corte, material da ferramenta, geometria e revestimento da ferramenta (KITAGAWA; KUBO; MAEKAWA, 1997).

Dentre estas ligas, o Inconel 718 destaca-se por suas características de resistência a altas temperaturas, alta dureza e afinidade por reagir com o material da ferramenta, ocasionando deformação ou quebra da ferramenta à matriz austenítica da liga provocando rápido endurecimento, causando desgaste da ferramenta, isso somado a baixa condutividade térmica desses materiais gerando altas temperaturas na interface entre o cavaco e a peça, comprometendo assim a qualidade de acabamento superficial da peça usinada.

Para obter maior qualidade de usinagem dessas ligas, alguns parâmetros são essenciais no que se refere ao controle da usinagem, como avanço, velocidade de corte e profundidade, pois os efeitos destes parâmetros influenciam diretamente no comportamento da ferramenta e a eficiência do processo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho foi elaborado com o objetivo de estudar a rugosidade do corpo de prova e o desgaste das ferramentas através da usinagem por torneamento de uma liga de Inconel 718 utilizando ferramentas de metal duro.

1.1.2 Objetivos específicos

Analisar o desgaste da ferramenta e a rugosidade do corpo de prova, a fim de identificar quais os melhores parâmetros para a usinagem desta superliga.

1.2 Estrutura do trabalho

O trabalho é constituído primeiramente em uma revisão teórica, a qual servirá para um melhor entendimento do assunto proposto, onde serão tratados alguns temas visando o conhecimento necessário das ferramentas utilizadas no estudo, apresentadas no capítulo 2.

Na metodologia serão abordados os métodos para a usinagem, a medição da rugosidade do corpo de prova e observação do desgaste da ferramenta de corte, presentes no capítulo 3.

Em seguida, são apresentados os resultados obtidos, onde verifica-se qual a menor rugosidade e menor desgaste de ferramenta de corte para uma certa velocidade de rotação(m/min), dispostos no capítulo 5.

E por fim, no capítulo 6, são realizadas as considerações finais, onde serão descritas as conclusões do trabalho, assim como, algumas propostas para projetos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Usinagem

Usinagem é um termo que cobre vários processos de manufatura que envolvem remoção de material. Kalpakjian (2000) expõe que a remoção de material visa a obtenção das formas finais, acabamento superficial adequado e se alcançar os valores de tolerância requeridos. Quase todos os produtos manufaturados têm componentes que foram usinados. O processo de usinagem depende de variáveis independentes de entrada, de variáveis dependentes e de interações entre as variáveis (HANDBOOK, 1989). As variáveis independentes de entrada são: o material a ser usinado, geometria de partida do material, seleção do processo de usinagem, ferramenta de corte recoberta ou não, parâmetros de corte, geometria da ferramenta, fluido de corte. Já as variáveis dependentes são principalmente, forças de corte e avanço, as quais estão relacionadas com a velocidade de corte, profundidade de corte, ferramenta, fluido e material usinado, acabamento superficial.

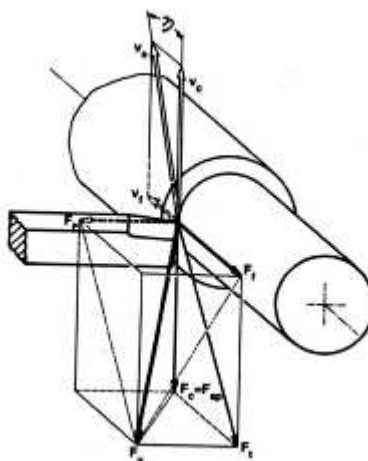
De acordo com Shaw e Cookson (1984), a rugosidade está relacionada com a integridade da superfície, sendo um dos aspectos mais importantes a serem avaliados em uma superfície usinada. A rugosidade é caracterizada pela presença de sulcos formados pela ferramenta durante o corte. A rugosidade é analisada principalmente em termos de parâmetros como rugosidade média (R_a), rugosidade máxima (R_y), rugosidade total (R_t). O processo de torneamento consiste na utilização de ferramentas com corte em um único ponto, o qual é fixo. A ferramenta remove material de uma peça que gira. Dos parâmetros que regem, os principais são a velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. A velocidade de corte é a velocidade instantânea do movimento de corte, no ponto de corte, geralmente expressa em ft/min ou m/min . O avanço consiste na distância percorrida pela ferramenta na direção axial a cada revolução, medida no plano de trabalho.

Segundo normas da ABNT, a profundidade de corte é a espessura de material removido da peça, medida na direção radial, ou seja, é a profundidade ou largura de penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. Shaw e Cookson (1984) revelam que o produto desses três parâmetros resulta na taxa de remoção de material, que é geralmente utilizada na medição da eficiência do processo de usinagem.

Segundo Shaw e Cookson (1984), o cavaco é o material produzido durante o corte nos processos de usinagem. Em princípio, o cavaco é assumido como sendo uma fita contínua de largura constante, com um plano de cisalhamento bem definido, o que na verdade não ocorre. A força de usinagem é dada pela resultante dos esforços que atuam sobre a cunha cortante. Na verdade, não se trabalha com a força de usinagem propriamente dita,

mas sim com suas componentes. A figura 1 ilustra a força de usinagem e suas componentes na operação de torneamento. Esses esforços variam durante o processo de usinagem e podem ser utilizados para estudar os mecanismos de formação de cavaco.

Figura 1 – Força de usinagem e suas componentes na operação de torneamento



Fonte: Adaptado de Ferraresi (1977).

2.2 Geometria das ferramentas de corte

De acordo com Shaw e Cookson (1984), a vida da ferramenta, compreende-se a quantidade de material removido por uma ferramenta sob determinadas condições de usinagem até o instante em que tal ferramenta se torne inoperante ou atinja níveis de desgaste incompatíveis à continuidade da operação. Devido à grande implicância de seu desempenho na usinagem, mais especificamente no torneamento, é patente que a concepção de ferramentas de corte não é meramente uma questão de ângulos ou perfis em escalas macrométricas, mas também de inspeção e controle da forma de seu contorno em uma escala mais acurada, dentro de alguns micrometros. Em uma avaliação mais generalista, é possível identificar e catalogar alguns tipos de desgaste que ocorrem nos materiais, como desgaste por atrito, abrasivo, erosivo, difusivo, corrosivo e desgaste por fratura.

2.2.1 Usinabilidade

Segundo Handbook (1989), a usinabilidade de um material, bem como outras propriedades de fabricação, são tão importantes como as propriedades mecânicas. Na verdade, a usinabilidade descreve genericamente as características operacionais da ferra-

menta de corte. Segundo Peckner e Bernstein (1977), a usinabilidade de um material metálico é influenciada por vários fatores, dentre eles, composição química, microestrutura, resistência do material, avanço utilizado na usinagem, velocidade de corte, penetração e escolha do fluido de corte. Há três aspectos que caracterizam, a usinabilidade, que são a vida da ferramenta, acabamento superficial e esforços requeridos para o corte. Assim, a usinabilidade pode ser definida com auxílio de alguns critérios tais como vida e desgaste da ferramenta, acabamento superficial, remoção de cavaco, velocidade de corte e produtividade. A usinabilidade também depende de variáveis do processo de usinagem, tais como rigidez da ferramenta, geometria e material da ferramenta, tipo do fluido de corte e tipo da operação de usinagem.

2.2.2 Usinagem a seco

A tendência para solucionar os problemas ambientais, de saúde e econômicos é a utilização da usinagem sem fluido de corte, conhecida como usinagem a seco, que está sendo cada vez mais viabilizada devido às constantes inovações tecnológicas. Contudo, a condição prévia que deve ser encontrada para ocorrer tal mudança é manter os tempos de corte, vidas das ferramentas e qualidade das peças usinadas no mesmo nível daquele que se têm quando se usina com fluidos de corte. A tendência mundial visa à usinagem sem fluido de corte (seco), que objetiva reduzir de forma significativa custos com a compra de fluidos de corte e sua destinação final, bem como problemas ocupacionais, tais como doenças de pele (dermatites) e variações de sintomas respiratórios, e relacionados ao meio ambiente, onde os fluidos de corte tornam-se graves poluentes da água, solo e ar (SENAI, 2008).

2.2.3 Lubrificação e Refrigeração em Usinagem

Os fluidos de corte quando aplicados de maneira correta podem contribuir para o aumento da produtividade e reduzir os custos, tornando possível o uso de altas velocidades de corte, maiores avanços e o uso de maiores profundidades de corte. A aplicação eficaz de fluidos de corte pode também prolongar a vida da ferramenta, diminuir a rugosidade da superfície da peça, aumentar a precisão dimensional, e diminuir a quantidade de energia consumida, em comparação com o corte a seco.

Para uma correta seleção do fluido de corte é necessário o conhecimento dos tipos e funções, limitações físicas, composição química e propriedades dos fluidos que atendam às exigências de cada processo de usinagem. No entanto, a água causa problemas de oxidação nas partes da máquina e da peça. Para minimizar os efeitos da corrosão causada

pela água na peça, na ferramenta e na máquina, óleos foram misturados à água formando emulsões, melhorando assim a lubrificação do conjunto peça/ferramenta/máquina (FERRARESI, 1977).

Desde então, grandes avanços tecnológicos foram obtidos e um número muito grande de fluidos de corte encontra-se comercialmente disponível, cabendo aos planejadores de produção selecionar o mais adequado para uma aplicação no seu processo. Um fluido ideal não deve só melhorar o processo de corte, mas também deve satisfazer certo número de outros requisitos. Ele não deve ser tóxico ou ofensivo para o operador, não deve ser inflamável, não deve ser nocivo para o sistema de lubrificação da máquina-ferramenta, não deve ser corrosivo para o material da peça, devendo dar alguma proteção contra a corrosão para a superfície de metal recentemente cortado e, obviamente, deve ser o mais barato possível. (SHAW; COOKSON, 1984)

2.3 Superligas de Níquel

A utilização do níquel como elemento de liga remonta aos primórdios da civilização moderna. Análises químicas feitas em artefatos como armas, ferramentas e moedas antigas, mostram a presença de níquel em quantidades variadas. Manuscritos chineses sugerem que a primeira liga contendo níquel, a Pai-Thong ou cobre branco, foi produzida adicionando zinco aos minérios de níquel, e era utilizada no Oriente desde 1400-1700 a.C. No entanto, a facilidade de confundir as minas de níquel com as de prata induzem a pensar que, na realidade o uso do níquel foi posterior, a partir do século IV a.C.

O níquel na forma elementar ou misturado com outros materiais trouxe contribuições significativas para a sociedade atual e ainda tem muito a contribuir para o desenvolvimento tecnológico. Pesquisas têm sido direcionadas no desenvolvimento de suas ligas, pois apresentam características como resistência mecânica associada à resistência à corrosão, tanto à temperatura ambiente como às temperaturas elevadas.

2.3.1 Estruturas e Microestruturas

O níquel é um metal dúctil com estrutura cúbica de face centrada (CFC) e não sofre transformações em sua estrutura básica abaixo da temperatura de fusão. Estudos contínuos dos elementos de liga e da microestrutura têm levado ao desenvolvimento das ligas à base de níquel. De uma forma geral, pode-se dizer que as ligas à base de níquel são caracterizadas e reforçadas por alguns elementos de liga que tendem a melhorar a sua microestrutura ou fase, conforme descrito a seguir (EZUGWU; WANG; MACHADO, 1999):

- Matriz da liga (γ). A matriz contínua à base de níquel possui uma estrutura cúbica de face centrada (CFC) ou fase austenítica, que é reforçada normalmente por elementos em solução sólida, tais como cobalto, cromo, molibdênio e tungstênio;
- Fase Gama linha (γ'). Às ligas são adicionados alumínio e titânio na mesma proporção, formando precipitados do tipo $Ni_3(Al, Ti)$, que também possuem estrutura cristalina CFC, coerentes com a matriz austenítica;
- Carbonetos. Adição de carbono em aproximadamente 0,05 - 0,2%, reagindo com outros elementos e formando precipitados primários do tipo MC. Durante o tratamento térmico estes carbonetos se decompõem formando outros carbonetos tais como $M_{23}C_6$ e M_6C , os quais precipitam ao longo dos contornos de grãos;
- Para muitas ligas, as técnicas de tratamento térmico têm sido desenvolvidas para gerar um filme de precipitados (γ') nos contornos de grão, pois acredita-se que isso promova um aperfeiçoamento das propriedades de resistência à ruptura;
- O Nb pode substituir o (Al, Ti), formando Ni_3Nb , designado por (γ''), que é uma fase tetragonal de corpo centrado – TCC.

2.3.2 Aplicações das Ligas de Níquel

Atualmente as ligas à base de níquel constituem aproximadamente 45 - 50% dos materiais utilizados na fabricação de componentes de turbinas de avião devido à sua excepcional resistência mecânica, a oxidação e boas características em condições extremas de temperatura. Ligas de níquel são usadas hoje também em veículos espaciais, motores de foguete, aviões experimentais, reatores nucleares, submarinos, equipamento petroquímico e em outras aplicações de altas temperaturas (EZUGWU; WANG; MACHADO, 1999).

A grande variedade de aplicações, são destacadas em aeronaves (turbinas a gás), sistemas de energia nuclear, indústrias químicas e petroquímicas, discos, câmaras de combustão, parafusos, carcaças, eixos, sistemas de exaustão, estojos, lâminas, pás, turbinas, reversores e etc. Aplicações médicas, uso odontológico, prótese, dispositivos, etc.

2.4 INCONEL 718

O Inconel 718 pertence à família das superligas de níquel e teve o seu desenvolvimento no ano de 1959 por H.L. Eiselstein, com o objetivo de ser utilizado como disco de turbina em motores a jato desenvolvidos pela General Electric (ULUTAN e OZEL, 2010). É

uma liga metálica de alta resistência mecânica e a corrosão, excelente resistência a fluência, endurecível por precipitação formando compostos intermetálicos, apropriada para trabalhar em altas temperaturas. É uma liga que apresenta grande resistência a corrosão e a oxidação em uma variedade de meios agressivos.

O Inconel 718 é uma superliga composta predominantemente de níquel-ferro-cromo, que representa atualmente quase a metade do total de superligas utilizadas no mundo, tendo uma grande variedade de aplicações, dentre elas pode-se citar: Indústria aeroespacial, em componentes para indústria do petróleo, turbina a gás, reservatórios criogênicos e na indústria nuclear (PATEL; SMITH, 2001).

A composição química típica da liga Inconel 718, de acordo com a especificação API (UNS N07718), é apresentada na figura 2.

Figura 2 – Composição química da liga 718 - API (UNSN07718)

Elemento	Ni	Cr	Fe	Nb+Ta	Mo	Ti	Al	Co
% Peso	50,0	17,0	Bal.	4,75	2,80	0,65	0,20	1,0
	55,0	21,0		5,50	3,30	1,15	0,80	máx
Elemento	C	Mn	Si	P	S	B	Cu	Pb
% Peso	0,08	0,35	0,35	0,015	0,015	0,006	0,30	0,001
	máx	máx	máx	máx	máx	Máx	máx	máx

Fonte: Adaptado de (API, 2004)

O Inconel 718 apresenta um alto teor de nióbio que é responsável pela fase altamente endurecedora γ'' (Ni_3Nb). Observa-se também baixos teores de tungstênio, molibdênio, e tântalo que são responsáveis pelo endurecimento por solução sólida nas ligas de níquel, e baixos valores de alumínio e titânio, constituintes da fase γ' . Evidenciando assim, que o mecanismo mais efetivo de endurecimento desta liga é a precipitação da fase γ'' . É importante ressaltar também o alto teor de ferro e praticamente a ausência de cobalto, o que resulta na redução do custo da liga (REED, 2006; PAULONIS e SCHIRRA, 2001).

As ligas 718 são projetadas para serviço entre 427 a 727° C, nessa faixa de temperatura suas propriedades mecânicas (resistência, tenacidade, alta e baixa ciclagem) são determinantes na vida dessa liga (XAVIER et al., 2009).

O Inconel 718 à base de níquel contém 5 à 5,5% de nióbio, caracterizando-se assim como a liga mais importante dentre as dezenas de superligas usadas em operações corrosivas e em altas temperaturas (SENAI, 2008).

Segundo Choudhury (1998), as superligas à base de Inconel 718 possuem uma matriz austenítica que é responsável por sua baixa usinabilidade, pois endurece rapidamente durante a usinagem e seu cisalhamento produz um tipo de cavaco em forma de dentes e de difícil aproveitamento e manuseio. Esta liga apresenta altas temperaturas de usinagem, geralmente acima de 100° C, e uma alta zona de tensão de corte, acima de

3450 MPa, acelerando assim o desgaste de flanco, entalhe ou cratera, dependendo da matéria da ferramenta e das condições de corte.

Special Metals Corporation é empresa detentora dos direitos e que desenvolve esta liga, o Inconel 718, segundo ela tem uma ampla margem de utilização térmica, podendo operar entre -252 e $705^{\circ}C$, caracterizando assim uma grande performance com relação a alta resistência a fadiga, tração, fluência e resistência à ruptura, sendo utilizada em foguetes, anéis, turbinas de aeronaves e também em componentes que trabalham em altas temperaturas.

2.4.1 Usinagem de Superliga de Níquel

Embora o níquel possua um ponto de fusão mais baixo, cerca de $1.452^{\circ}C$ em relação a outras ligas de alta dureza, na maioria das vezes, apresenta uma grande dificuldade de usinagem, se comparado com o ferro que tem ponto de fusão perto de $1.535^{\circ}C$. Sua estrutura é cúbica de face centrada, tornando-se um metal dúctil e, ao contrário do ferro, não sofre transformações em sua estrutura cristalina até seu ponto de fusão. A vida útil da ferramenta tende a ser curta devido aos desgastes de flanco e de entalhe, com possibilidade de ocorrer também a deformação da aresta de corte em velocidades relativamente baixas de usinagem, quando utilizando metal duro. Assim, a taxa máxima admissível de remoção do metal é baixa. As forças de usinagem são mais elevadas na usinagem do níquel do que do ferro comercialmente puro. A área de contato na superfície de saída da ferramenta é muito grande, com um ângulo de cisalhamento pequeno, geralmente produzindo cavacos muito grossos (SHAW; COOKSON, 1984) e (WITTING, 2002).

Da mesma forma que acontece com o ferro e outros metais puros, não se forma arestas postiças de corte na usinagem do níquel puro, e a força de corte tende a diminuir à medida que a velocidade de corte aumenta, pois a área de contato cavaco-ferramenta torna-se menor e o cavaco mais fino.

Contudo, para todas as velocidades de corte, as forças são relativamente elevadas. As temperaturas geradas na zona de fluxo também são elevadas, promovendo altas taxas de desgaste da ferramenta.

Devido a sua alta resistência mecânica em altas temperaturas, resistência à oxidação e a sua baixa usinabilidade. Segundo Ezugwu (1999), as superligas à base de níquel são consideradas os materiais com a mais baixa usinabilidade dentre aqueles usualmente utilizados na indústria metal mecânica. Ainda segundo os autores, essa baixa usinabilidade é devido a diversos fatores, dentre eles:

- Grande parte de sua resistência é mantida durante a usinagem, devido a sua alta resistência a elevadas temperaturas;

- Ocorrência de encruamento, o qual contribui para o surgimento do desgaste de entalhe na altura da profundidade de corte;
- Desgaste abrasivo da ferramenta devido à presença de diversos carbonetos com dureza elevada;
- Fusão de material da peça na ferramenta durante a usinagem;
- Produção de um cavaco longo, de difícil controle durante a usinagem contribuindo para a degradação da ferramenta por fratura;

Os problemas mais comuns encontrados durante a usinagem das superligas à base de níquel estão relacionadas à geração de calor durante o processo de deformação e atrito entre o cavaco/ferramenta/peça, o que contribui para elevar as temperaturas associadas (EZUGWU, 2005).

Os modos de falha dominantes na usinagem de superligas à base de níquel com ferramentas de metal duro são desgaste de flanco e entalhe na ponta da ferramenta e/ou na altura da profundidade de corte. Essas ferramentas, normalmente, não podem ser utilizadas na usinagem em altas velocidades, pois elas não suportam as condições extremas de temperatura e tensão na zona de corte (EZUGWU E WANG, 1996).

2.4.2 Materiais e ferramentas utilizados na usinagem das superligas de Níquel

Segundo Ezugwu, Wang e Machado (1999) a vida da ferramenta quando empregadas a este tipo de usinagem é curta se comparada com aços carbono comum nas mesmas velocidades de corte, aumentando o custo de produção. Os principais parâmetros considerados a fim de se obter um melhor desempenho do processo de usinagem são: seleção do material e geometria da ferramenta, método de usinagem, velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Com o controle desses parâmetros, pode-se conseguir um maior tempo de vida para as ferramentas durante a usinagem, já as ferramentas relacionadas à usinagem das superligas devem atender aos aspectos: excelente resistência aos mecanismos de desgaste; alta resistência mecânica; possuir dureza e tenacidade em elevadas temperaturas; boa resistência ao choque térmico; alta condutividade térmica e suficiente estabilidade química em altas temperaturas (SHAFFER, 1999) e (EZUGWU; WANG; MACHADO, 1999).

2.4.3 Tipo de desgaste das ferramentas de corte

Durante a usinagem as ferramentas de corte sofrem alterações na sua geometria, independente da sua dureza ou resistência ao desgaste. Estas alterações estão relacionadas aos desgastes e às deformações plásticas.

As avarias ocorrem de surpresa e envolvem a quebra, lascamento e ou trinca da aresta de corte da ferramenta. As quebras podem ser consequência do crescimento excessivo dos desgastes ou evolução do desgaste da ferramenta de corte (trinca ou lasca). A quebra também pode ocorrer inesperadamente devido a alguns fatores como uma ferramenta muito frágil, carga excessiva, ângulo de ponta e cunha pequenos, entupimento dos canais de expulsão dos cavacos, etc. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

O lascamento consiste na retirada de partículas durante o processo de corte da ferramenta, e ocorre principalmente em ferramentas de material frágil (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

As trincas são causadas pela variação da temperatura e/ou pela ação dos esforços mecânicos. No corte interrompido as temperaturas flutuam ciclicamente aumentando durante o tempo ativo, diminuindo durante o tempo inativo da aresta de corte a cada revolução da ferramenta (MACHADO et al., 2015).

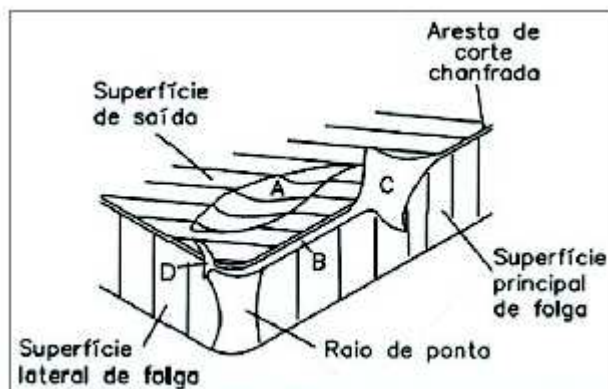
Este fenômeno é muito raro de ocorrer durante o torneamento, é mais comum ocorrer durante o fresamento, devido aos choques térmicos e mecânicos inerentes a esse processo. O desgaste envolve a perda gradual e progressiva de material da ferramenta, sendo que a abrasão, difusão, adesão e à oxidação são os principais mecanismos envolvidos. Nesse processo, a temperatura é um fator determinante e atinge ferramentas de corte de qualquer material.

Na deformação plástica ocorre uma mudança na geometria da aresta de corte pelo deslocamento de material na direção de fluxo de material do cavaco ou da peça. Isto ocorre devido a uma combinação de altas tensões (compressão e cisalhamento) e de temperaturas na superfície de corte da ferramenta (MACHADO et al., 2015).

Todas as ferramentas de corte estão sujeitas ao desgaste, que podem se localizar tanto na superfície de saída quanto na superfície de folga. O tipo de desgaste depende da geometria da ferramenta, do material da ferramenta, da composição química e das propriedades mecânicas do material da peça e das condições de usinagem. A Figura 3 apresenta esquematicamente os típicos desgastes encontrados nas ferramentas de corte (MACHADO et al., 2015).

- Desgaste de flanco (B) ocorre na superfície de folga da ferramenta;
- Desgaste de cratera (A) ocorre na superfície de saída da ferramenta;
- Desgaste de entalhe (C e D), normalmente ocorre na superfície de folga da ferramenta, podendo se estender, às vezes, pela superfície de saída.

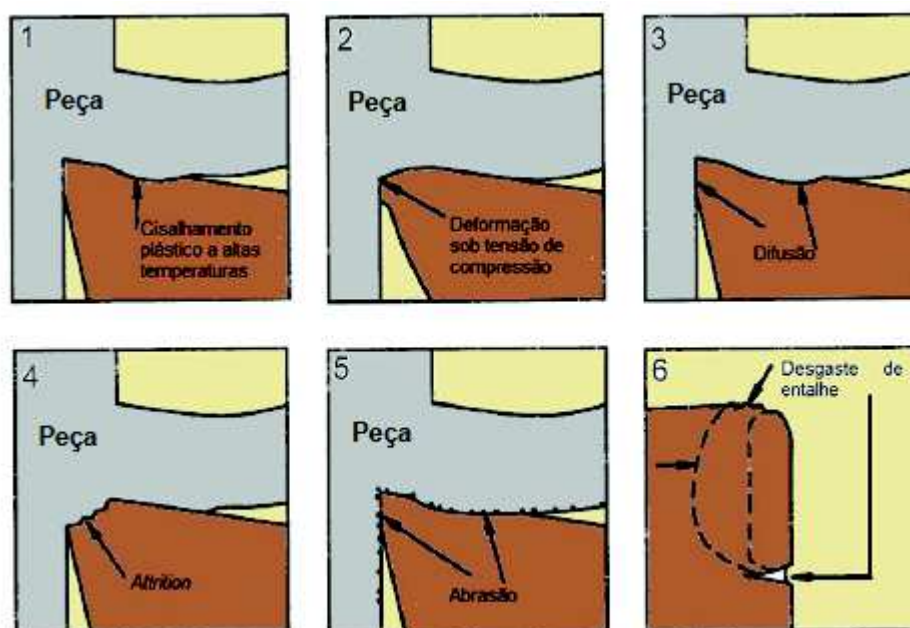
Figura 3 – Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte



Fonte: Adaptado de Shaw e Cookson (1984).

Segundo Shaw e Cookson (1984) e Wright (2000) há seis diferentes mecanismos de desgaste nas ferramentas de corte, conforme representado esquematicamente na Figura 4.

Figura 4 – Mecanismos de desgaste que ocorrem nas ferramentas de corte



Fonte: Adaptado de TRENT e WRIGHT, 2000

O desgaste por deformação plástica superficial por cisalhamento a altas temperaturas ocorre principalmente na usinagem de materiais com alto ponto de fusão, utilizando-se ferramentas de aço rápido ou metal duro. As elevadas temperaturas desenvolvidas na interface cavaco/ferramenta reduzem a tensão de escoamento do material da ferramenta, e com isso as tensões de cisalhamento ali geradas são suficientes para causar a deforma-

ção plástica superficial na superfície de saída da ferramenta, promovendo a formação de crateras (MACHADO et al., 2015).

Segundo Astakhov (1998), o desgaste por deformação plástica da aresta de corte sob altas tensões de compressão ocorre principalmente na usinagem de materiais que possuem elevada dureza em ferramentas de aço rápido ou metal duro. A combinação de altas tensões de compressão com elevadas temperaturas na superfície de saída podem provocar deformação plástica na aresta de corte. Em altas velocidades de corte e avanços elevados, a deformação plástica pode levar a uma falha catastrófica da ferramenta. A difusão é a grande responsável pelo desgaste de cratera. Como esse mecanismo envolve a transferência no nível atômico, a superfície tem um aspecto liso.

A oxidação é uma grande responsável pelo desgaste de entalhe nas ferramentas, ocorre principalmente na região em que a combinação de altas temperaturas, ar e água (presente no fluido de corte) está presente, ou seja, nas regiões do final da profundidade de usinagem, tanto na superfície primária quanto na secundária de folga (DINIZ et al., 2001).

A aderência e arrastamento ocorrem geralmente a baixas velocidades de corte, nas quais o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta torna-se irregular. Esse mecanismo envolve destacamento de fragmentos microscópicos da superfície da ferramenta (grãos), que são arrastados junto com o cavaco, deixando a superfície com um aspecto áspero (MACHADO et al., 2015).

Segundo Machado et al. (2015) o desgaste abrasivo pode envolver deformação plástica e fratura frágil, provocando perda ou deslocamento de material devido ao microsulcamento, microcorte ou microlascamento. Esse mecanismo pode ocorrer nas ferramentas de aço rápido, ferramentas revestidas, cerâmicas puras e mistas.

O desgaste por entalhe não é propriamente um mecanismo, mas sim uma forma de desgaste conforme representado esquematicamente nas (áreas C e D da Figura 3). Porém, não existe um consenso na literatura que explique exatamente o mecanismo que provoca o desgaste de entalhe. Esse tipo de desgaste ocorre principalmente na usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas e com alto índice de encruamento como as ligas de níquel, titânio e aços inoxidáveis austeníticos (MACHADO et al., 2015).

As altas temperaturas associadas às altas tensões de compressão no plano de cisalhamento secundário, a abrasão e a aderência sobre a superfície de saída da ferramenta, fadigas térmicas devido à natureza cíclica da formação do cavaco e as tensões cíclicas na interface cavaco-ferramenta são os principais responsáveis pelos desgastes das ferramentas de corte (ASTAKHOV, 1998).

2.4.4 Ferramentas para usinagem do Inconel

Sims, Stoloff e Hagel (1972) afirmam que das muitas variáveis que afetam qualquer operação de usinagem, a ferramenta de corte, embora pequena e relativamente barata, é uma das mais críticas. Os requisitos para qualquer material de ferramenta de corte utilizada para usinagem de ligas à base de níquel devem incluir: (i) boa resistência ao desgaste; (ii) alta resistência e tenacidade; (iii) elevada dureza a quente; (iv) boa resistência a choque térmico; (v) estabilidade química adequada em altas temperaturas.

Geralmente, os resultados que prevalecem nos processos de usinagem de superligas à base de níquel utilizando ferramentas de metal duro sem revestimento são elevados tempos principais e tempos mortos na troca de ferramental, além dos altos custos de ferramentas. (WITTING, 2002). No tocante à geometria da ferramenta, um ângulo ortogonal de saída maior, positivo, por exemplo, reduz o trabalho de corte. Com isso a temperatura diminui na zona primária de cisalhamento. (NOVASKI e DÖRR, 1999). Por outro lado, isso tende a diminuir a resistência mecânica da ferramenta, tornando-a mais suscetível a avarias.

O revestimento das ferramentas tem uma importância fundamental quando se pretende elevada resistência ao desgaste em temperaturas altas e baixo coeficiente de atrito em relação à peça. (NOVASKI E DÖRR, 1999)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, apresentam-se todos os equipamentos e materiais utilizados, assim como o planejamento experimental e os procedimentos adotados ao longo do trabalho. Estes detalhes são importantes para facilitar a compreensão dos métodos utilizados, e possibilitar uma correta aplicação das técnicas empregadas, seja em meio acadêmico ou industrial, e ainda garantir a confiança dos resultados obtidos.

Os experimentos deste trabalho foram realizados no Laboratório de Usinagem dos Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA).

3.1 Equipamentos

Neste item, serão apresentados, além da máquina-ferramenta, todos os instrumentos utilizados para aferição e medição das variáveis estudadas neste trabalho.

3.1.1 Máquina-Ferramenta

Os ensaios de torneamento da superliga à base de níquel Inconel 718C, foram realizados em um torno CNC da marca Romi, modelo Centur 30D, com comando numérico GE-Fanuc 2li-T potência do motor principal de 9 kW e rotação máxima do eixo árvore de 4000 rpm (variação contínua), a figura 5 mostra a máquina descrita.

Figura 5 – Torno CNC utilizado nos ensaios



Fonte: Autor Próprio

3.1.2 Microscópio Óptico

Para identificar e mensurar o desgaste nas ferramentas de corte foi utilizado um microscópio digital da marca Duratool com uma Relação de ampliação de 1000x. Figura (6)

Figura 6 – Microscópio Óptico



Fonte: Autor Próprio

3.1.3 Rugosímetro

Para aferir medir a rugosidade da superfície usinada durante os ensaios realizados, foi utilizado um rugosímetro portátil TR-200 uma base magnética como suporte do apalpador e uma base em “V” para apoio do corpo de prova durante a leitura da rugosidade Figura 7.

Figura 7 – Rugosímetro utilizado nos ensaios



Fonte: Autor Próprio

3.1.4 Corpo de Prova

Para medir a rugosidade da superfície usinada durante os ensaios realizados, foi utilizado um rugosímetro portátil TR-200 uma base magnética como suporte do apalpador e uma base em “V” para apoio do corpo de prova durante a leitura da rugosidade. (Figura 8).

Figura 8 – Porcentagem de composição do inconel 718

C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	Ti	Al	Nb	Mo
0,027	0,057	0,021	18,98	54,51	16,78				
%	%	%	%	%	%	0,96%	0,5%	5,1%	3,33%
P	S	Cu	Co	V	W	Sn	Zr	MG	B
0,006	0,004	0,069	0,089	0,018	0,06	0,004	0,019	0,001	0,004
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%

Fonte: (API, 2004)

3.1.5 Ferramentas

Para realizar este trabalho, foram selecionadas ferramentas de metal duro como mostra a figura 9, com códigos:

- TNMG 160404-ha Pc9030 – revestida com titânio e fabricada pela empresa world Tools;
- TNMG 160404 nn Dc100 – sem revestimento e fabricada pela empresa World Tools.

Figura 9 – Incerto metal duro revestido e não revestido, respectivamente.



Fonte: (API, 2004)

4 METODOLOGIA

Nos experimentos com ferramentas de metal duro, os parâmetros velocidade de corte, avanço e profundidade de corte foram fixados de acordo com valores recomendados em catálogos e ensaios preliminares.

Após a fixação do corpo de prova no torno CNC, foram realizados 6 (seis) ensaios, um ensaio para cada ferramenta, sem utilização de fluido lubrificante, a fim de analisar especificamente o contato entre peça-ferramenta. Foram realizados 3 passes para cada ferramenta com avanço constante de 0,2 mm/volta. Foram utilizadas 6 ferramentas de duas classes diferentes (3 de cada classe), para cada classe de ferramenta variou-se a velocidade de corte entre 100, 200 e 300 m/mim. Pelo fato do corpo de prova ser único, e com dimensões de 410 *mm* de comprimento e 51 *mm* de diâmetro como mostra a figura 10, foram calculados através da equação 1, os deslocamentos totais dos passes para que cada ferramenta usinasse a mesma quantidade de material (cavaco).

$$C_t = \pi.D.L \quad (1)$$

Ao todo, todas as ferramentas usinaram 8 metros de cavaco por passada, como foram 3 (três) passadas, cada ferramenta usinou aproximadamente 24 m de cavaco. Foram realizados passes no diâmetro externo do corpo de prova no sentido longitudinal ao longo do comprimento, após a finalização da usinagem a ferramenta era retirada e submetida a análise no microscópio óptico a fim de comparar ao final do experimento o desgaste de cada ferramenta para as diferentes velocidades de corte, não foi possível analisar milimetricamente o nível de desgaste em cada ferramenta, a análise foi feita apenas visualmente. Após a usinagem realizada para as diferentes ferramentas, o corpo de prova era retirado do torno e submetido ao teste de rugosidade a fim de definir após o experimento qual velocidade de corte e qual ferramenta mais adequada para um melhor acabamento do corpo de prova, foram feitas 3 medições de rugosidade na peça para cada ferramenta e velocidade, como o corpo de prova é cilíndrico (360°), as medições foram separadas 120° uma da outra, a medição com menor rugosidade considerando a média das medições foi considerada a melhor.

Figura 10 – Corpo de prova Liga Inconel 718



Fonte: Autor Próprio

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a usinagem foram coletados os dados de rugosidade do corpo de prova e desgaste da ferramenta. Em seguida, a ferramenta de corte foi analisada ao microscópio, onde foram obtidas imagens específicas de cada ferramenta. As tabelas e imagens a seguir mostram o tipo de ferramenta, avanço e velocidade de corte para cada uma das ferramentas utilizadas.

Tabela 1 - Resumo dos Testes

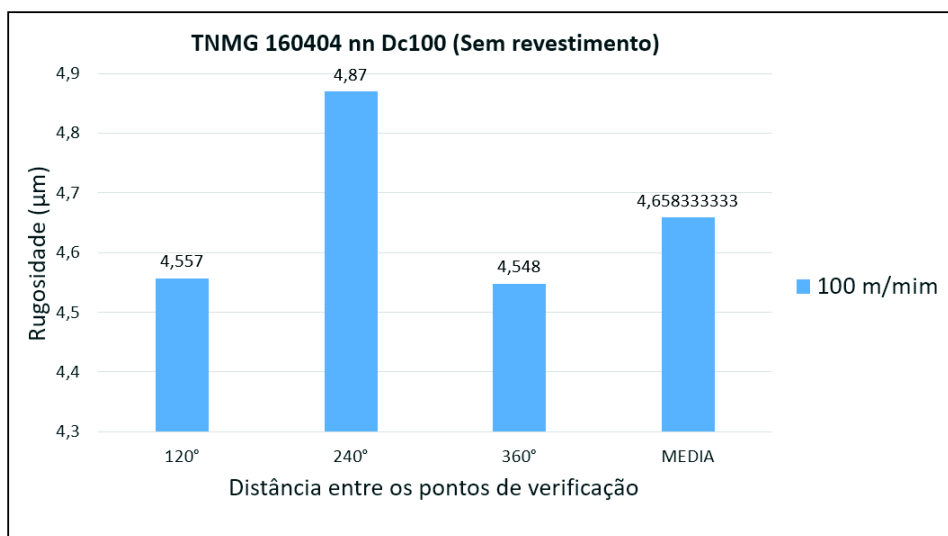
Ferramenta	Velocidade de corte (m/mim)	Avanço (mm)	Rugosidade media (μm)
TNMG 160404-ha Pc9030	100	0,2	4,523
TNMG 160404-ha Pc9030	200	0,2	6,079
TNMG 160404-ha Pc9030	300	0,2	5,306
TNMG 160404 nn Dc100	100	0,2	4,658
TNMG 160404 nn Dc100	200	0,2	6,944
TNMG 160404 nn Dc100	300	0,2	6,521

Fonte: Autor Próprio

Analisando apenas a tabela 1, fica claro que na menor velocidade de corte a rugosidade é menor, causando assim um melhor acabamento no corpo de prova. Mas com relação a desgaste de ferramenta as velocidades influenciam bastante, como mostram os gráficos e imagens a seguir.

5.1 Ferramenta TNMG 160404 nn Dc100

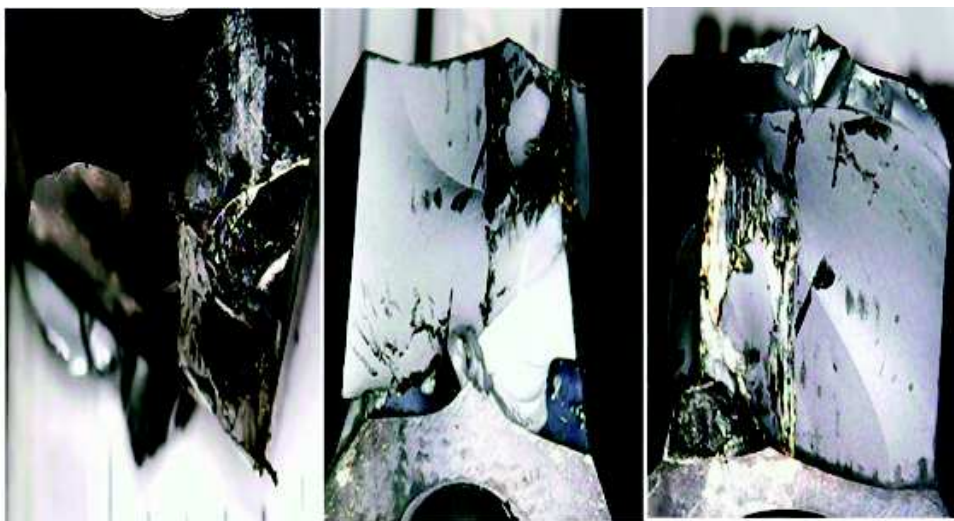
A seguir serão mostrados os gráficos de rugosidade do corpo de prova e imagens das ferramentas de corte logo após serem submetidas ao teste.

Figura 11 – Ferramenta TNMG 160404 nn Dc100 com velocidade de (100 m/mim)

Fonte: Autor Próprio

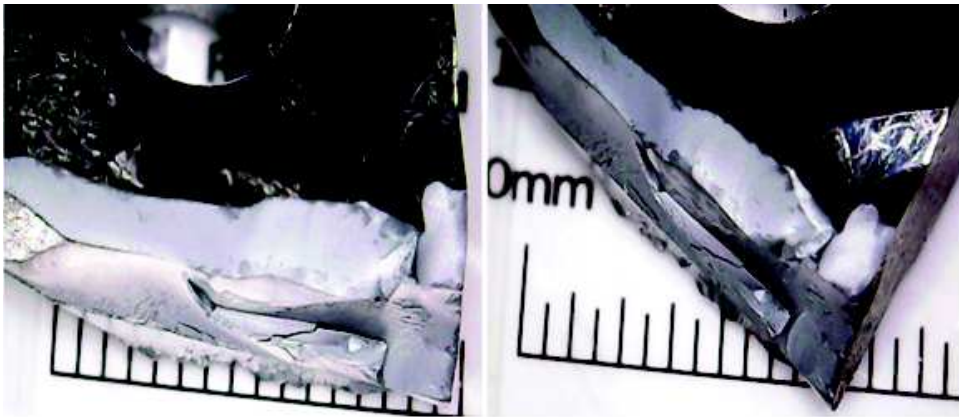
Embora os dados de rugosidade do corpo de prova tenham sido satisfatórios para esta velocidade (100 m/mim), foi necessário utilizar duas ferramentas de corte, pois a primeira ferramenta foi completamente rompida, como mostra a figura 12. A segunda ferramenta também sofreu danos significativos, mas não chegou a romper, apenas sofreu lascamento, como mostra a figura 13.

Figura 12 – Figura de corte 1, rompida



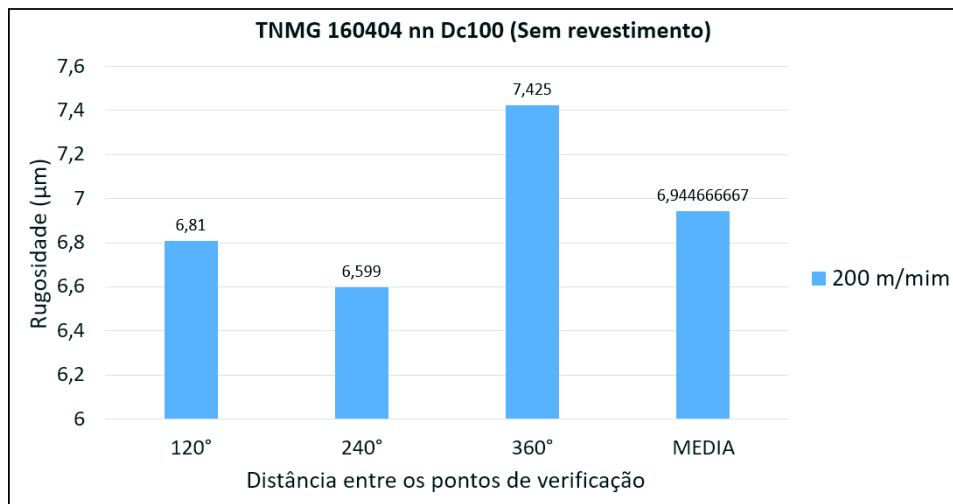
Fonte: Autor Próprio

Figura 13 – Figura de corte 2



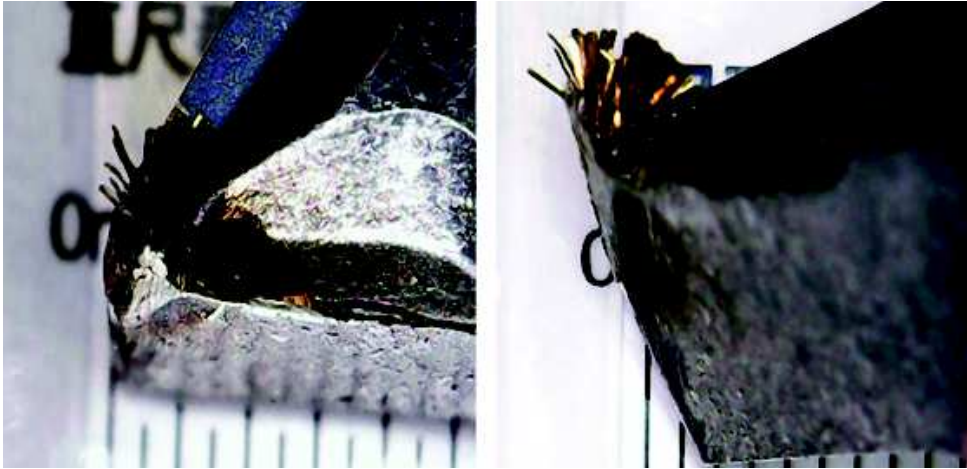
Fonte: Autor Próprio

Embora a velocidade de corte seja a menor testada, as ferramentas foram as que mais sofreram danos, isso acontece pelo tempo de contato em entre peça/ferramenta aumentar devido a menor velocidade, aumentando assim a temperatura de contato e sobrecarregando a ferramenta.

Figura 14 – Ferramenta TNMG 160404 nn Dc100 (200 *m/mim*)

Fonte: Autor Próprio

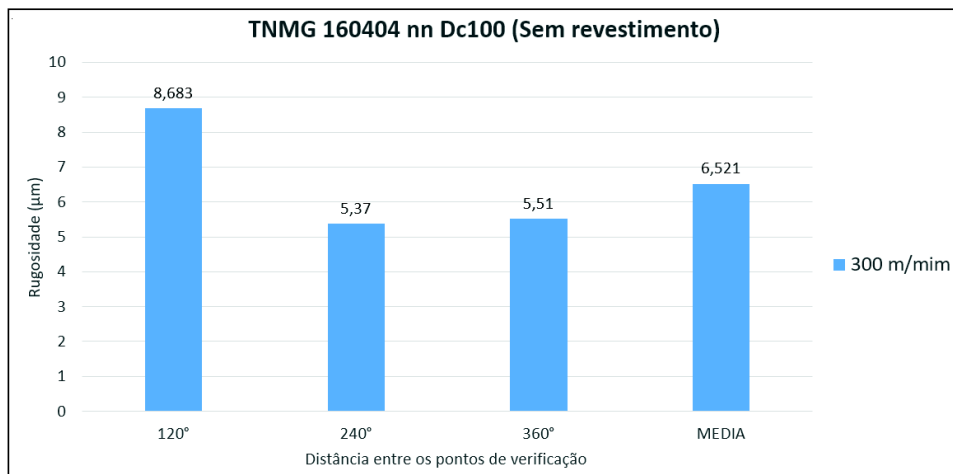
Figura 15 – Ferramenta de corte a 200 m/mim



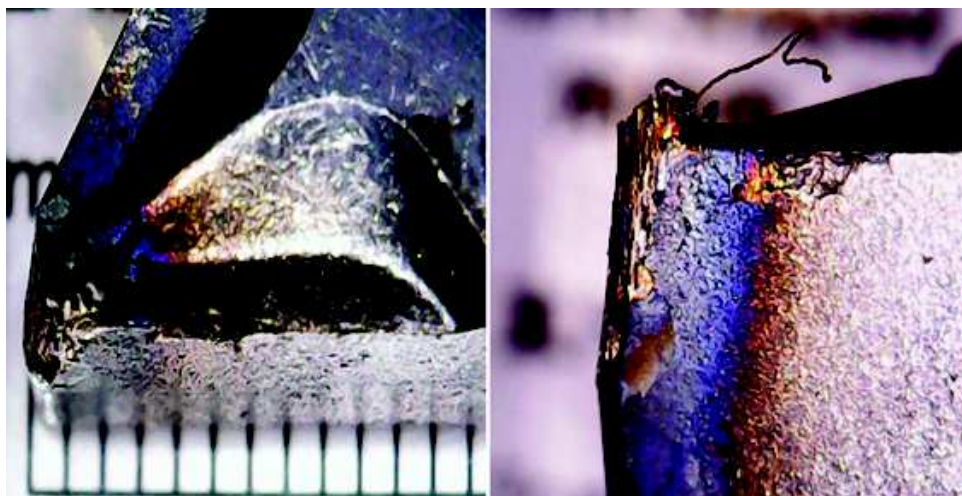
Fonte: Autor Próprio

Como nota-se na figura 15, a ferramenta sofreu danos visíveis, mas dentro do padrão de extravio de ferramenta. Nota-se também disparidade nas medições de rugosidade, isso pode ocorrer pelo aumento da velocidade de corte e pelo desgaste da ferramenta.

Figura 16 – Ferramenta TNMG 160404 nn Dc100 (200 m/mim)



Fonte: Autor Próprio

Figura 17 – Ferramenta de corte a 300 m/mim 

Fonte: Autor Próprio

Pelo fato da velocidade de corte ser bastante elevada (300 m/mim) os danos na ferramenta de corte (figura 17), foram de pouca relevância, embora a discrepância das medições de rugosidade sejam visíveis, isso acontece devido ao aumento da velocidade de corte e alguma possível vibração na rotação do torno.

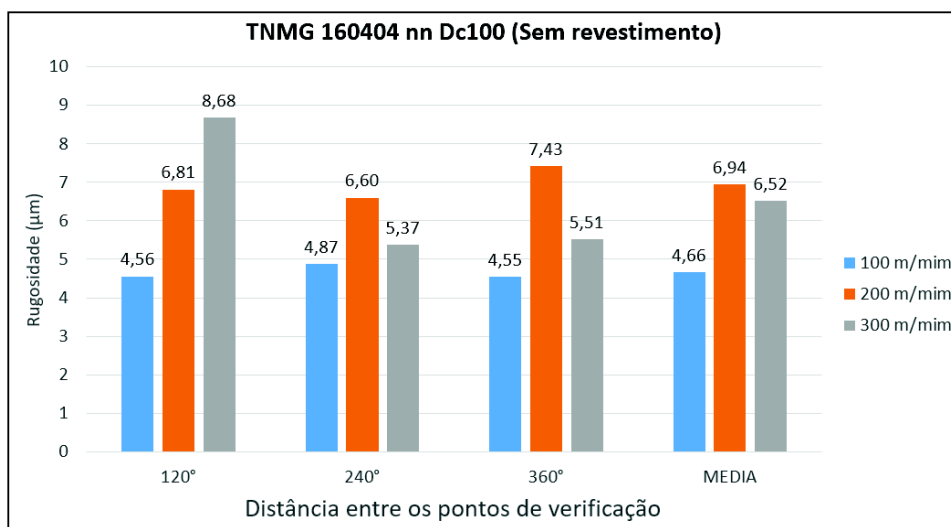
A tabela a seguir mostra todos os valores obtidos para todas as ferramentas e velocidades de corte, seguido do gráfico comparativo das mesmas.

Tabela 2 - Valores das medições de rugosidade.

Rugosidade do corpo de prova / Ferramenta TNMG 160404 nn Dc100				
Velocidade/Ângulo	120°	240°	360°	Media
100 m/mim	4,557 μm	4,870 μm	4,548 μm	4,658 μm
200 m/mim	6,810 μm	6,599 μm	7,425 μm	6,944 μm
300 m/mim	8,683 μm	5,370 μm	5,510 μm	6,521 μm

Fonte: Autor Próprio

Figura 18 – Ferramenta TNMG 160404 nn Dc100 - Comparação entre as velocidades de corte



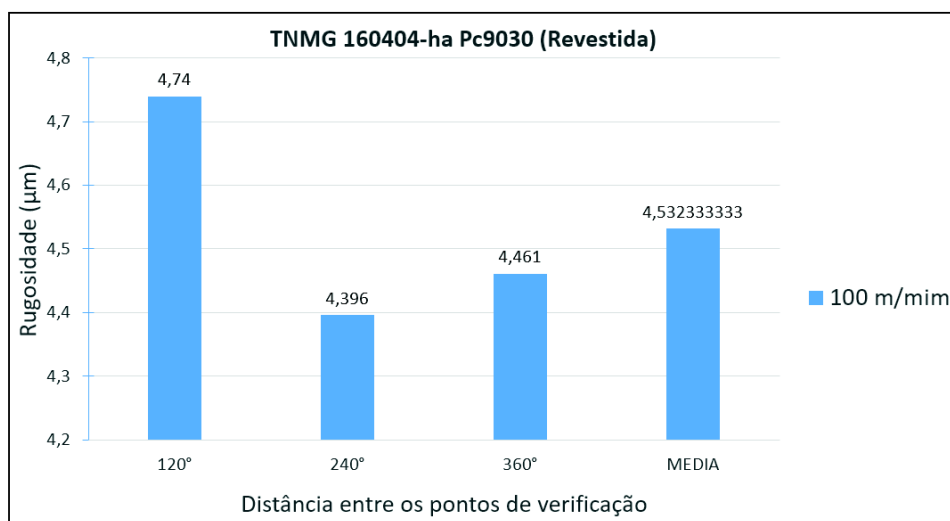
Fonte: Autor Próprio

Analisando todos os dados, conclui-se que, a ferramenta que opera a 100 *m/mim* teve a menor rugosidade, logo, um melhor acabamento do corpo de prova, embora tenha tido um maior desgaste de ferramenta.

5.2 Ferramenta TNMG 160404-ha Pc9030

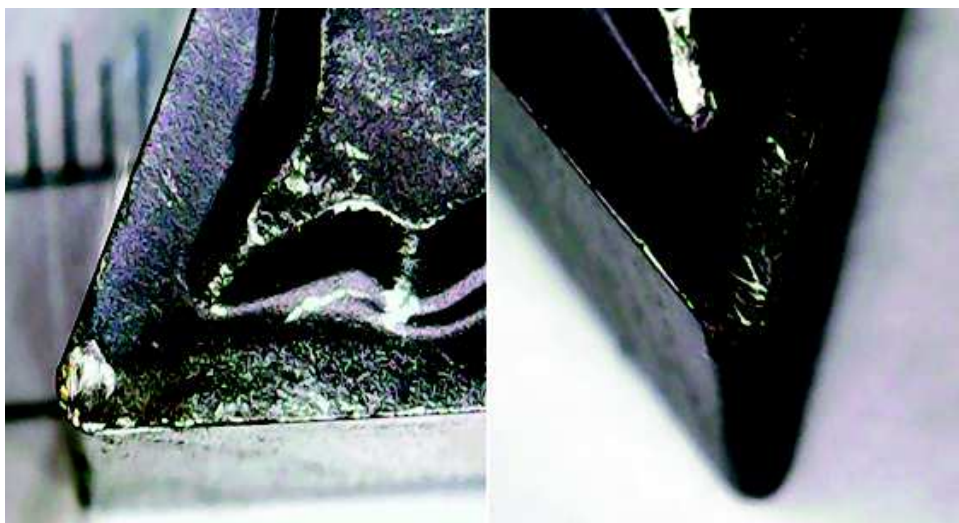
A seguir serão mostrados os gráficos de rugosidade do corpo de prova e imagens das ferramentas de corte logo após serem submetidas ao teste. Pelo fato da ferramenta ser revestida, o desgaste na ferramenta foi menor comparado as ferramentas não revestidas.

Figura 19 – Ferramenta TNMG 160404-ha Pc9030 (100 m/mim)



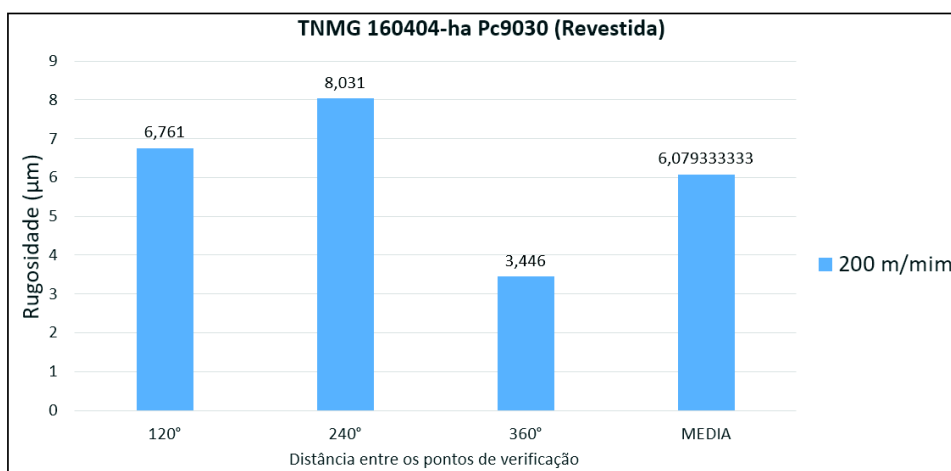
Fonte: Autor Próprio

Figura 20 – Desgaste da ferramenta de corte a 100 m/mim

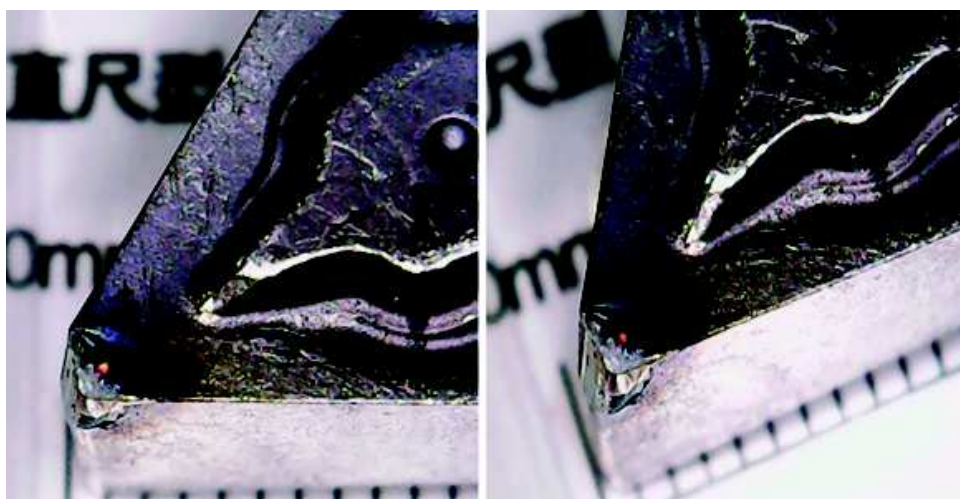


Fonte: Autor Próprio

Novamente, a menor velocidade teve uma menor rugosidade do corpo de prova, conseqüentemente um melhor acabamento, mas diferente da ferramenta não revestida que rompeu, a ferramenta revestida quase não sofreu danos visíveis como mostra a figura 20.

Figura 21 – Ferramenta TNMG 160404-ha Pc9030 (200 m/mim)

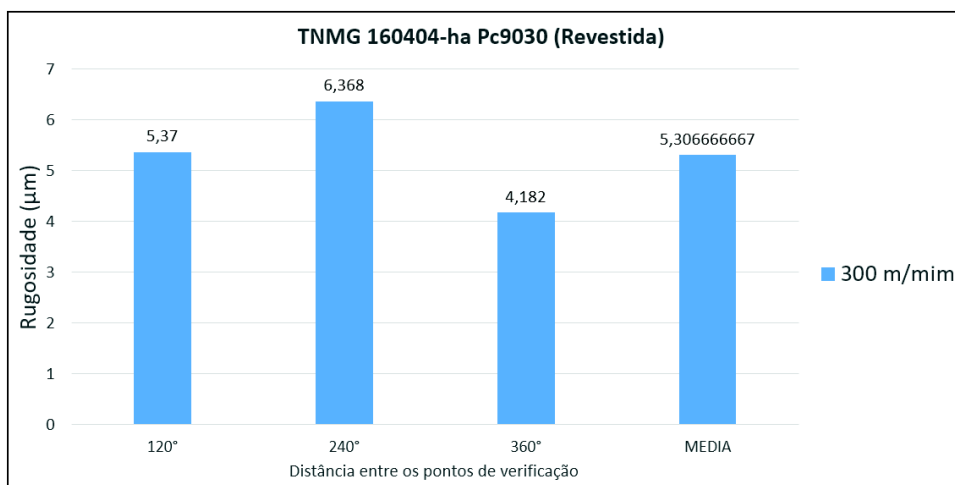
Fonte: Autor Próprio

Figura 22 – Desgaste da ferramenta de corte a 200 m/mim .

Fonte: Autor Próprio

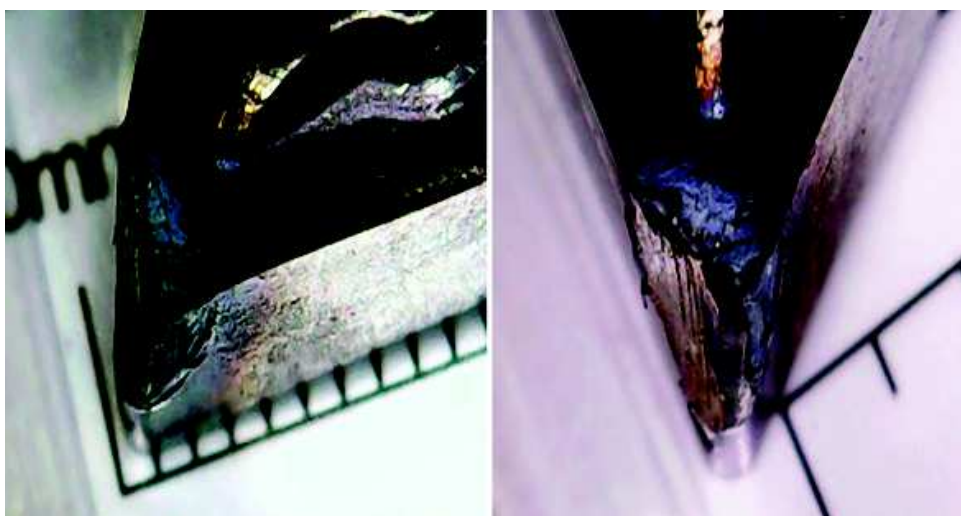
Como nota-se na figura 22, a ferramenta sofreu um desgaste visível, mas novamente dentro do padrão de extravio de ferramenta. É notório também a disparidade nas medições de rugosidade, isso pode ocorrer pelo aumento da velocidade de corte e vibração do torno.

Figura 23 – Ferramenta TNMG 160404-ha Pc9030 (300 m/mim)



Fonte: Autor Próprio

Figura 24 – Desgaste da ferramenta de corte a 300 m/mim



Fonte: Autor Próprio

A figura 24, mostra um maior desgaste se comparado com as outras ferramentas revestidas, isso é causado pelo aumento da velocidade de corte, aumentando assim um aumento da temperatura da ferramenta, além da vibração do torno.

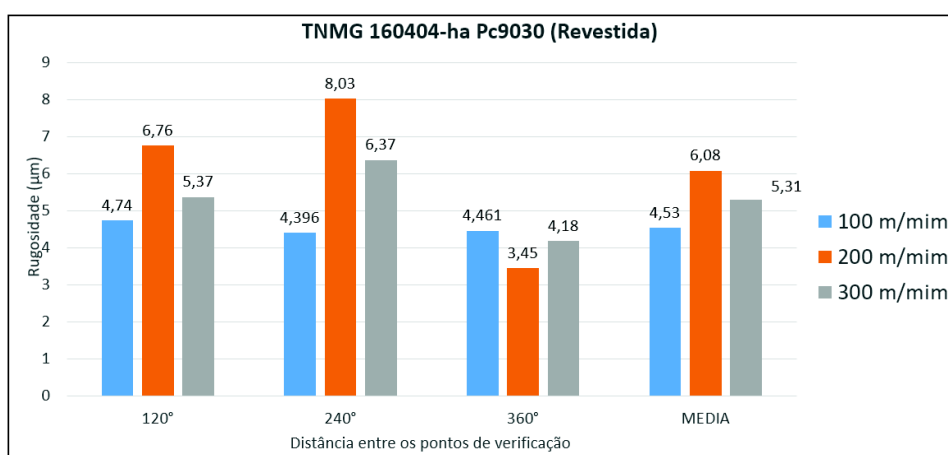
A tabela 3 mostra os valores obtidos para todas as ferramentas e velocidades de corte, seguido do gráfico comparativo das mesmas.

Tabela 3 - Valores das medições de rugosidade

Rugosidade do corpo de prova / Ferramenta TNMG 160404 – há Pc9030				
Velocidade/Ângulo	120°	240°	360°	Media
100 m/mim	4,740 μm	4,396 μm	4,461 μm	4,532 μm
200 m/mim	6,761 μm	8,031 μm	3,446 μm	6,079 μm
300 m/mim	5,370 μm	6,368 μm	4,182 μm	5,306 μm

Fonte: Autor Próprio

Figura 25 – Valores das medições de rugosidade

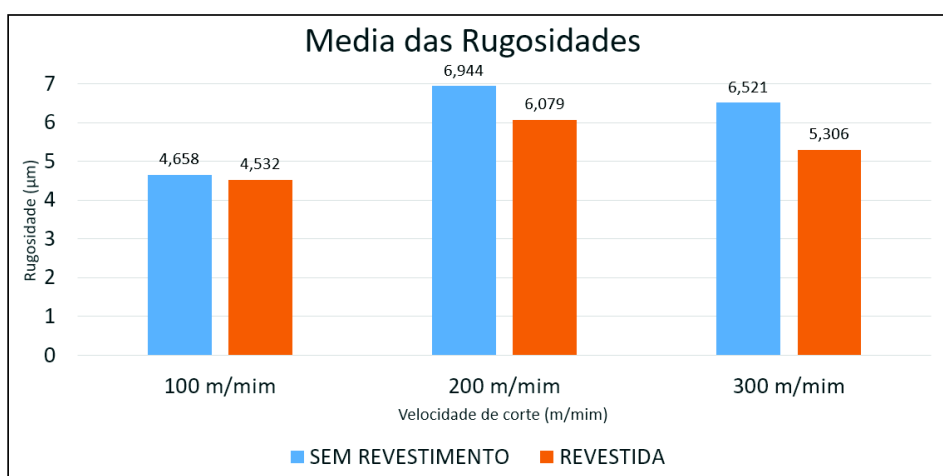


Fonte: Autor Próprio

Analisando os dados da tabela 3, conclui-se que, a ferramenta que opera a 100 *m/mim* teve a menor rugosidade, logo, um melhor acabamento do corpo de prova e pouco desgaste na ferramenta de corte.

O gráfico a seguir mostra um comparativo das rugosidades dos corpos de prova, com as distintas velocidades.

Figura 26 – Comparativo das rugosidades dos corpos de prova - 100 *m/mim*, 200 *m/mim* e 300 *m/mim*



Fonte: Autor Próprio

Fica claro que a rugosidade do corpo de prova, usinado com ferramentas de corte revestidas são menores que usinadas sem revestimentos.

6 CONCLUSÃO

Através dos gráficos e figuras mostrados na seção 4, podemos notar o baixo desempenho em vida da ferramenta sem revestimento (TNMG 160404 nn Dc100), para as velocidades de corte testadas (100, 200 e 300 m/min), vindo a romper totalmente a ferramenta com a menor velocidade (100 m/min), o contrário acontece com a ferramenta com revestimento (TNMG 160404-ha Pc9030) que se suportou melhor a todas as velocidades de corte. O baixo desempenho em vida das ferramentas é devido à alta resistência do material e ao fato do corpo de prova ser usinado sem o auxílio de lubrificantes, o que aumenta significativamente o atrito em peça-ferramenta.

Em termos de rugosidade, nota-se que, com o aumento da velocidade de corte a rugosidade diminui, porém em certos pontos o desgaste excessivo da ferramenta faz com que a rugosidade passe a aumentar com o aumento da velocidade de corte. As ferramentas sem revestimento apresentaram um baixo nível para a quebra de cavaco, fazendo com que em alguns pontos a peça usinada fosse danificada, inviabilizando o uso da ferramenta, em alguns casos vindo a romper por completo. De modo geral, podemos afirmar que o melhor desempenho foi da ferramenta revestida, apresentando menor nível de desgaste e um melhor índice de rugosidade no corpo de prova.

6.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Para melhor desempenho na usinagem do Inconel 718, sugiro para os próximos experimentos a utilização de fluido lubrificante, pois ajudaria a diminuir o desgaste da ferramenta, utilização de ferramentas de corte cerâmicas que conhecidamente são mais indicadas para a usinagem de superligas pois resistem melhor a altas temperaturas aumentando sua vida útil. Fazer usinagem a quente do corpo de prova, pois com uma temperatura mais elevada sua usinabilidade tende a ser mais fácil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTAKHOV, V. P. **Metal cutting mechanics**. [S.l.]: CRC press, 1998.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. [S.l.]: Artliber Editora, 2006.

EZUGWU, E. Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Elsevier, v. 45, n. 12-13, p. 1353–1367, 2005.

EZUGWU, E.; WANG, Z.; MACHADO, A. The machinability of nickel-based alloys: a review. **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, v. 86, n. 1-3, p. 1–16, 1999.

FERRARESI, D. **Fundamentals of Metal Cutting (Fundamentos da Usinagem dos Materiais)**. [S.l.]: Editora Edgard Blucher, São Paulo (in Portuguese), 1977.

HANDBOOK, A. Volume 16: Machining. **ASM International Handbook Committee, ASM International, Electronic**, 1989.

HANDBOOK, M. Vol. 16 (1989). **Machining-ASM International, USA**.

KALPAKJIAN, S. Schmid. sr, 2000. **Manufacturing Engineering and Technology**.

KITAGAWA, T.; KUBO, A.; MAEKAWA, K. Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of inconel 718 and ti 6al 6v 2sn. **Wear**, Elsevier, v. 202, n. 2, p. 142–148, 1997.

MACHADO, Á. R. et al. Teoria da usinagem dos materiais. **São Paulo: Blucher**, v. 3, 2015.

PATEL, S.; SMITH, G. The role of niobium in wrought superalloys. In: **International Symposium on Niobium 2001**. [S.l.: s.n.], 2001. p. 1081–1108.

PECKNER, D.; BERNSTEIN, I. M. Handbook of stainless steels. **McGraw-Hill Book Co., New York. 1977,(Chapters paged separately)**, 1977.

SENAI. **Usinagem a seco**. 2008. Disponível em: <<https://www.scribd.com/document/28557433/Usinagem-a-Seco-3>>.

SHAFFER, W. R. Cutting tool edge preparation. **TECHNICAL PAPERS-SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS-ALL SERIES-**, SME; 1999, p. All–All, 1999.

SHAW, M. C.; COOKSON, J. **Metal cutting principles**. [S.l.]: Clarendon press Oxford, 1984.

WITTING, H. Torneamento de superligas. **Máquinas e metais**, v. 38, n. 440, p. 156–165, 2002.

XAVIER, M. D. et al. Mecanismos de endurecimento da superliga inconel 718. **Revista Eletrônica de Educação e Tecnologia do SENAI-SP**, v. 3, n. 7, p. 1–11, 2009.