

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA – CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE FERRAMENTAS DE
METAL-DURO E CERÂMICA NO FRESAMENTO DO INCONEL 718

por

Lukas Oliveira Giaccobo

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, maio de 2021.

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Giaccobo, Lukas Oliveira
AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE FERRAMENTAS
DE METAL-DURO E CERÂMICA NO FRESAMENTO DO INCONEL 718
/ Lukas Oliveira Giaccobo. -- 2021.
22 f.
Orientador: André João de Souza.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Inconel 718. 2. Fresamento frontal. 3. Inserto
de cerâmica Sialon. 4. Inserto de metal-duro com
revestimento PVD. I. Souza, André João de, orient.
II. Título.

Lukas Oliveira Giaccobo

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE FERRAMENTAS DE
METAL-DURO E CERÂMICA NO FRESAMENTO DO INCONEL 718**

**ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Prof. Dr. Mario Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. André João de Souza

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Porto Alegre, 21 de maio de 2021.

À minha mãe,

Iara Marli Cambraia de Oliveira,

por ser meu alicerce durante toda minha vida,
pelo amor incondicional demonstrado a mim,
e por toda a alegria que trouxe a todos ao seu redor.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à pessoa que mais me incentivou e ajudou a percorrer todo o caminho até este presente trabalho. À pessoa que jamais esquecerei e que levarei em meus pensamentos e, principalmente, em meu coração. Em memória de minha mãe, Iara Marli Cambraia de Oliveira.

Ao meu pai, José Giaccobo, pela força e persistência apresentadas durante todos estes anos.

Ao meu filho, José Vieira Giaccobo, que ainda não nasceu, mas já traz uma imensa felicidade a todos que o aguardam.

À minha futura esposa, Thais Vieira da Silva, por todo amor e incentivo dados a mim.

Ao Prof. Dr. André João de Souza, por aceitar ser meu orientador, oferecendo um suporte de excelência na elaboração deste trabalho.

Ao meu orientador de estágio, Eng. Giovani da Silva, por todo o conhecimento a mim transmitido durante o período de estágio na DIGICON e pela ajuda nos experimentos.

Ao meu colega de DIGICON, Luis Henrique Ferreira da Rosa, por sempre se mostrar disposto a ajudar, colaborando muito para a realização dos experimentos realizados na empresa.

Ao Supervisor Eng. Luiz Duarte, que possibilitou a realização deste presente trabalho e forneceu toda a estrutura necessária para o desenvolvimento do mesmo.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pelo ensino de extrema qualidade passado pelos profissionais que lá trabalham.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2021

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE FERRAMENTAS DE METAL-DURO E CERÂMICA NO FRESAMENTO DO INCONEL 718

Lukas Oliveira Giaccobo
lukasgiaccobo@yahoo.com

Resumo. *No cenário da Engenharia Mecânica, a otimização de processos produtivos é uma prática buscada por todas as empresas que almejam ser ou manter-se competitivas. Nesta perspectiva, este trabalho apresenta um estudo que visa atestar (física e financeiramente), via comparação de resultados, a substituição de insertos de metal-duro com revestimento PVD por insertos de cerâmica Sialon no fresamento frontal da liga à base de níquel Inconel 718 (AMS 5663). Para isso, o procedimento experimental dividiu-se em duas etapas. Primeira, um corpo de prova cilíndrico foi usinado com os insertos de metal-duro em uma face e com os insertos de cerâmica na outra face para mensurar a rugosidade, a dureza e a detecção de trincas. Segunda, o tempo de usinagem de um lote vinte de peças (dez com cada tipo de inserto) foi analisado, além da investigação das falhas (desgastes e avarias) dos insertos. A análise dos resultados mostrou que a utilização de insertos de Sialon não acarreta prejuízos físicos às peças e possibilita uma diminuição no tempo de usinagem em cerca de 70%, evidenciando que esta troca é adequada para o contexto proposto.*

Palavras-chave: *Inconel 718, Fresamento frontal, Inserto de cerâmica Sialon, Inserto de metal-duro com revestimento PVD.*

Abstract. *In the Mechanical Engineering scenario, the optimization of production processes is a practice sought by all companies that aim to be or remain competitive. In this perspective, this work presents a study that aims to attest (physically and financially), through comparison of results, the replacement of PVD-coated carbide inserts by Sialon ceramic inserts in the face milling of nickel-based alloy Inconel 718 (AMS5663). For this, the experimental procedure was divided into two steps. First, a cylindrical specimen was machined with carbide inserts on one side and with ceramic inserts on the other side to measure surface roughness, hardness, and crack detection. Second, the machining time of a batch of twenty parts (ten with each insert type) was analyzed, in addition to the investigation of tool failures (wear and damage). The analysis of the results shows that the utilization of Sialon inserts does not cause physical damage to the parts and allows a decrease in machining time of about 70%, showing that this exchange is suitable for the proposed context.*

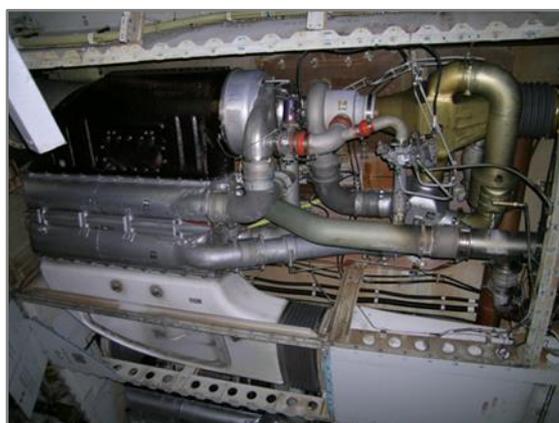
Keywords: *Inconel 718, Face milling, Sialon ceramic insert, PVD-coated carbide insert.*

1 INTRODUÇÃO

O aperfeiçoamento da usinagem de metais está atrelado ao desenvolvimento de novas tecnologias e, no cenário da engenharia, os aços possuem a maior aplicabilidade quando se trata de novos projetos mecânicos. Entretanto, em determinadas aplicações, estes não atendem certas exigências de projeto, como por exemplo, manter suas propriedades mecânicas, resistir à corrosão e resistir ao amolecimento quando submetidos a altas temperaturas [Oliveira, 2019].

A necessidade de se fabricar componentes mecânicos que resistam a tais condições críticas de funcionamento levaram à criação de superligas resistentes ao calor (HRSA – *heat-resistant super alloys*) que hoje estão presentes em motores de foguete, veículos espaciais, reatores nucleares, turbinas a gás entre outras aplicações [IMNF, 2006; Metalinox, 2021]. Dentre as HRSA, a liga à base de níquel Inconel 718 (AMS 5663) é amplamente utilizada, especialmente em motores e subsistemas de aeronaves, por não alterarem significativamente suas propriedades físicas e mecânicas quando utilizadas em tais aplicações. Um exemplo destes subsistemas, é o sistema de ar-condicionado de aeronaves de grande porte (Fig. 1), onde seus componentes mecânicos são submetidos a condições severas de funcionamento (mas não críticas, como no motor destas aeronaves), exigindo um maior controle de parâmetros de produção de seus componentes se comparado a outros sistemas de condicionamento de ar (como os de veículos automotores).

Figura 1 – Sistema de ar condicionado da aeronave Airbus 340



Fonte: Makris (2021)

A dificuldade de usinagem do Inconel 718, juntamente com os custos associados à operação de corte, levou à criação de novas estratégias de usinagem e à substituição de ferramentas convencionais por outras que apresentassem melhor desempenho e maior produtividade. Um exemplo desta última prática é a substituição de insertos de metal-duro com grãos ultrafinos e revestimento PVD por insertos com maior dureza a quente com o objetivo de otimizar a usinagem e promover aumentos de produtividade (como por exemplo, com o uso de insertos cerâmicos), sem maiores investimentos nos processos de usinagem [Santos, 2010].

A motivação para a realização do trabalho surgiu a partir da necessidade da empresa DIGICON S.A. de diminuir o tempo de usinagens realizadas em peças destinadas ao setor aeroespacial (mais precisamente, em um componente do sistema do ar-condenando de uma aeronave de grande porte) feitas a partir de Inconel 718 e, conseqüentemente, aumentar o tempo disponível das máquinas da fábrica para englobar serviços de usinagem que são, atualmente, terceirizados. Isto é possível, visto que insertos de cerâmica exigem velocidades de corte mais elevadas e, por conseguinte, geram menores tempos de usinagem que os insertos de metal-duro. Além disso, os primeiros realizam o fresamento a seco, enquanto que os segundos somente podem ser utilizados com a aplicação de fluido de corte em abundância. Entretanto, para esta aplicação, o custo dos insertos de cerâmica costuma ser bem maior que o dos insertos de metal-duro, ou seja, a vida dos insertos durante o fresamento de peças em Inconel 718 também deve ser considerada. O tempo de usinagem de cada peça para cada inserto é outro parâmetro de extrema significância, pois quanto maior o tempo de uma peça em máquina, maiores os custos associados a utilização da máquina-ferramenta, recursos humanos e menor o tempo de máquina disponível, fazendo com que outras operações de corte tenham que ser realizadas em outras máquinas operatrizes ou, até mesmo, havendo terceirização de serviços,

aumentando os custos associados aos processos produtivos. Essa troca de insertos provoca uma série de mudanças no custo-benefício relacionado à produção destas peças, assim como pode acarretar mudanças nos resultados físicos gerados no material, devendo ser explorada a fim de atestar a viabilidade da troca ferramental. Neste contexto, alguns estudos podem ser citados.

Grguraš et al. (2018) compararam o desempenho de ferramentas inteiriças de cerâmica Sialon com revestimento CVD de Al_2O_3 com ferramentas inteiriças de metal-duro com revestimento PVD de AlTiN no fresamento de topo do Inconel 718 aplicando diferentes meios lubrificantes. Os autores intencionaram determinar as melhores condições de uso para cada uma destas ferramentas, além da análise dos seus desgastes, tempo de vida útil e suas respectivas produtividades. Os resultados mostraram que a utilização a seco e com ar comprimido da ferramenta inteiriça de Sialon gerava um aumento na produtividade, mas que a eficiência da mesma ainda era questionável quando comparada à ferramenta inteiriça de metal-duro aplicando fluido emulsionável em abundância.

Soares (2013) avaliou o desempenho de insertos de metal-duro e cerâmica no torneamento longitudinal externo do Inconel 718 através da análise dos seus desgastes. Concluiu que o inserto de metal-duro mais indicado apresenta geometria SNMG-QM e revestimento CVD de TiAlN + Al_2O_3 + TiCN, e para os cerâmicos, o melhor desempenho foi obtido pelo inserto Sialon com geometria SNGN. Além disso, constatou que a produtividade do inserto cerâmico supera a do inserto de metal-duro, sendo necessário somente avaliar a parte financeira para determinar qual ferramenta apresenta uma melhor relação custo-benefício.

Dudzinski et al. (2004), realizaram uma revisão bibliográfica para entender melhor os parâmetros de usinagem utilizados no fresamento em alta velocidade (HSM – *high-speed milling*) do Inconel 718 com ferramentas de cerâmica e metal-duro, com enfoque no tipo de lubrificação aplicado. Determinaram que os custos de aquisição, uso, reaproveitamento e/ou descarte destes fluidos utilizados com insertos de metal-duro podem chegar, em alguns casos, a quatro vezes o valor de aquisição dos insertos de cerâmica, além de apresentar um prejuízo ambiental elevado e uma menor produtividade por serem utilizados em baixas velocidades de corte. Entretanto, os autores mencionam que a usinagem HSM induz deformação plástica e geração de calor, resultando em transformações metalúrgicas e tensões residuais de tração na camada superficial usinada do material. A profundidade da camada afetada e as tensões trativas geradas aumentam com o aumento da velocidade de corte. Soares (1998) cita que tensões trativas geradas na usinagem podem ser deletérias, uma vez que estas, ao se somarem às tensões trativas aplicadas no componente em serviço, incentivam a iniciação e o crescimento de trincas.

Assim, é possível ocorrer tal mudança de propriedades na usinagem de Inconel 718 com insertos de cerâmica, ao passo que a temperatura na interface ferramenta-peça é muito alta, encandecendo o cavaco que é expulso geralmente por ar comprimido durante a usinagem. Se o cavaco não é retirado corretamente, haverá aumento da temperatura, podendo haver recozimento da peça [Ezugwu et al., 2004].

No setor aeronáutico, os componentes precisam possuir uma elevada credibilidade na determinação de suas propriedades, pois a realização de voos demanda um índice de falhas igual a zero. Para atestar a integridade dos mesmos, os Ensaios Não-Destrutivos (END) são amplamente utilizados neste meio. Estes ensaios são realizados visando verificar a existência ou não de descontinuidades, anomalias ou defeitos, sem alterar quaisquer características químicas, físicas, mecânicas ou dimensionais do material analisado. Esta prática é indispensável em indústrias do setor aeroespacial, contribuindo na redução de custos, aumento da confiabilidade e garantia de maior qualidade na inspeção de materiais [Leite, 2013]. Além disso, a dureza da superfície pós-usinagem é medida a fim de verificar possíveis alterações, pois se os valores forem modificados, pode indicar que a peça sofreu alterações metalúrgicas. Esta variação de dureza, pode influenciar diretamente na resistência ao desgaste superficial (abrasão, adesão, difusão), sendo diretamente ligada à mudança da microestrutura ocasionada pelo processo de deformação plástica empreendida no material usinado [Marques, 2016].

Com este enfoque, o trabalho tem por objetivo avaliar comparativamente o desempenho de insertos de metal-duro com revestimento de PVD e de cerâmica Sialon no fresamento frontal da liga à base de níquel Inconel 718 (AMS 5663) com o intuito de atestar a viabilidade financeira da substituição do primeiro tipo pelo segundo sem que haja alterações na integridade da peça. Para tanto, serão avaliados os custos totais dos insertos, o tempo de vida e o tempo total de usinagem para cada conjunto de insertos. Com o intuito de atestar que o uso do insertos de cerâmica não acarreta alterações na integridade da superfície usinada, serão realizadas medições de rugosidade, de dureza (antes e depois da operação de corte) e a inspeção por END via líquido penetrante.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A liga à base de níquel Inconel 718 (AMS 5663) é uma liga que apresenta elevada resistência à ruptura por fluência a temperaturas elevadas, boa resistência à fadiga, resistência à corrosão em ambientes hostis, elevada resistência mecânica, inércia química e capacidade de ser utilizada em ambientes criogênicos [Ezugwu et al., 2003]. Este material, devido sua composição química e arranjo da mesma, apresenta baixa usinabilidade se comparado a aços que apresentam propriedades semelhantes à temperatura ambiente pelo fato de não alterar sua resistência à deformação plástica em temperaturas mais elevadas [Ezugwu et al., 2004]. As propriedades químicas do material utilizado para o experimento são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do Inconel 718 (% massa)

Elemento	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	Al	Co	Mn	Si
Min %	50,00	17,00	2,80	4,75	0,65	0,20	–	–	–
Max %	55,00	21,00	3,30	5,50	1,15	0,80	1,00	0,35	0,35
Elemento	Cu	C	Ta	P	S	B	Pb	Se	Bi
Min %	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Max %	0,30	0,08	0,05	0,015	0,015	0,006	0,0005	0,0003	0,00003

Fonte: AMS 5663 (2003)

Para analisar o desempenho dos insertos de metal-duro e de cerâmica no fresamento frontal do Inconel 718, o experimento foi dividido em duas etapas.

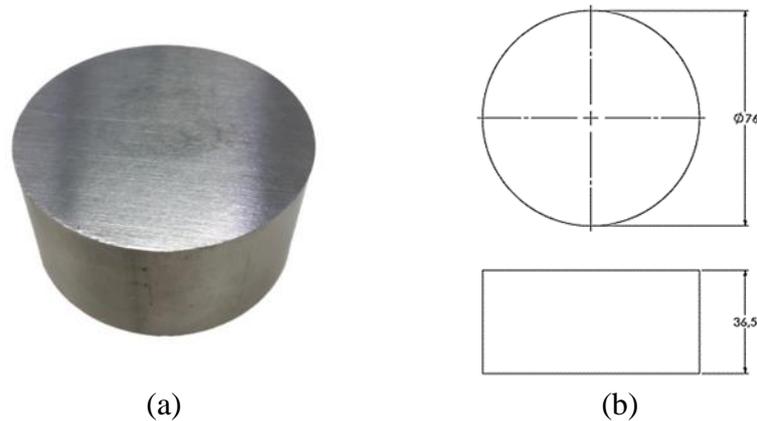
Na Etapa 1, as duas faces de um corpo de prova cilíndrico foram usinadas (uma face com cada tipo de inserto). A operação de corte consistiu em remover o mesmo volume de material no corpo de prova (faceamento com cerca de 1 mm de altura) em ambas as faces. Analisou-se a textura (rugosidade) e a integridade (dureza e detecção de trincas superficiais) geradas em cada caso. No caso da textura, mediu-se em cada face a rugosidade média (R_a) e a rugosidade média parcial (R_z). A dureza foi medida antes e após a usinagem com cada ferramenta. A integridade foi verificada através de ensaio não-destrutivo por líquido penetrante (detecção de trincas na superfície)

Na Etapa 2, quanto ao estado do inserto diante das falhas detectadas, avaliou-se a vida da ferramenta e o tempo de usinagem em uma etapa de produção de um lote de vinte peças (dez peças usinadas com cada tipo de ferramenta). Isso foi feito, pois os desgastes na usinagem do corpo de prova não foram significativos para permitir a análise do custo-benefício dos insertos na usinagem do Inconel 718.

2.1 Caracterização dos Corpos de Prova

Para realizar a análise da textura e da integridade da superfície usinada (Etapa 1) foi utilizado um corpo de prova cilíndrico de Inconel 718 (AMS 5663), endurecido a $43 \pm 0,5$ HRC em um forno próprio para tratamento térmico a uma temperatura de $718 \text{ }^\circ\text{C}$ por 8 horas e a $620 \text{ }^\circ\text{C}$ por 10 horas, com 76 mm de diâmetro e 36,5 mm de altura, mostrado na Figura 2.

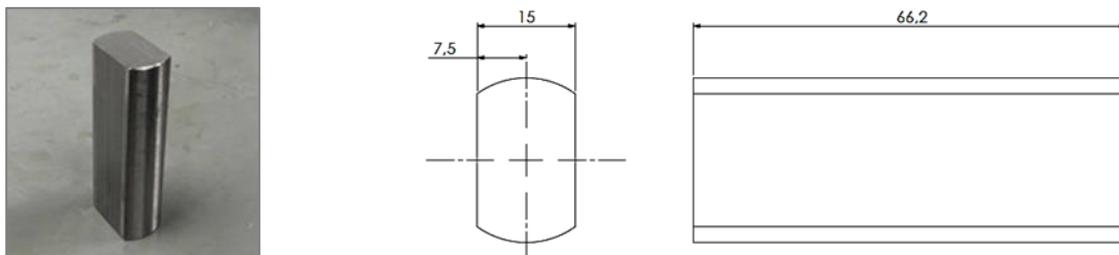
Figura 2 – Corpo de prova em Inconel 718: (a) imagem; (b) dimensões em mm.



Fonte: O autor (2021)

A análise dos desgastes sofridos pelos insertos e o tempo de usinagem para cada ferramenta de corte foi realizada a partir da produção de um lote de peças contido no portfólio da empresa, em que um volume de $15,94 \text{ cm}^3$ foi usinado no processo. Na operação de corte, a porção radial da peça e uma de suas faces foram usinadas. As propriedades químicas e mecânicas são iguais para o corpo de prova usado na Etapa 1 e o material utilizado na fabricação das peças produzidas pela empresa (mesmo lote). Na Etapa 2, as peças foram submetidas a usinagens partindo de uma barra com 25,4 mm de diâmetro e 76,2 mm de comprimento para gerar a forma geométrica ilustrada na Figura 3.

Figura 3 – Matéria prima utilizada na produção das peças na forma secundária (dimensões em mm)

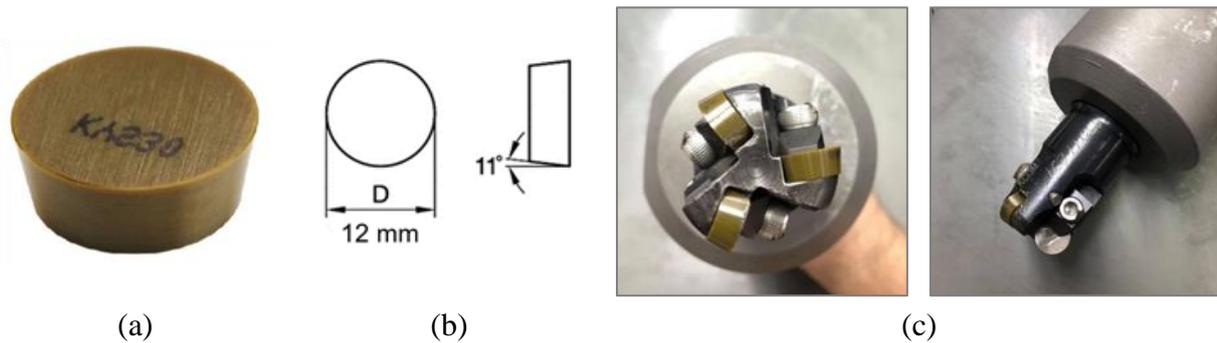


Fonte: O autor (2021)

2.2 Caracterização das Ferramentas

Para a usinagem de uma das faces da peça, foi utilizado um cabeçote para três insertos positivos de cerâmica Sialon Kennametal Kendex RPGN120400T01020 e diâmetro efetivo de 20 mm. Estes insertos apresentam excelente resistência ao desgaste quando usados com altos parâmetros de velocidade de corte e são indicados na usinagem de ligas termorresistentes [Kennametal, 2021]. A Figura 4 ilustra a ferramenta utilizada.

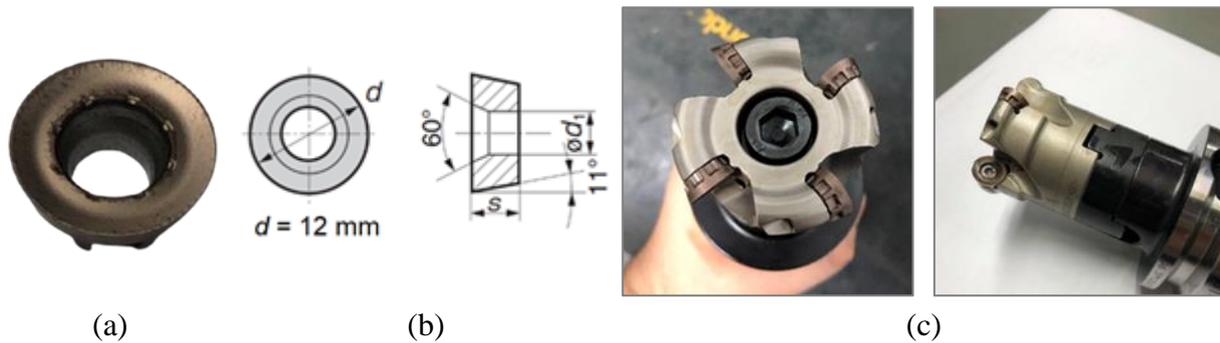
Figura 4 – Ferramenta de cerâmica Sialon: (a) inserto; (b) características; (c) ferramenta montada.



Fonte: O autor (2021)

Para a usinagem da outra face, foi utilizado um cabeçote para quatro insertos positivos de metal-duro Sumitomo RDET 1204M0EN-G classe ACM300 e diâmetro efetivo de 38 mm. Estes insertos possuem revestimento PVD multicamadas (maior dureza e maior resistência ao desgaste devido a uma fina estrutura de cristal com revestimento em nano camadas de AlTiCrBN) e são adequados para usinagem média e pesada de aços inoxidáveis e superligas resistentes ao calor [Sumitomo Tools, 2021]. A Figura 5 mostra a ferramenta utilizada nesta etapa.

Figura 5 – Ferramenta de metal-duro: (a) inserto; (b) características; (c) ferramenta montada.



Fonte: O autor (2021)

Em um primeiro momento, foi testada a usinagem com um cabeçote com suporte para três insertos a fim de se analisar o desempenho para um número de insertos (iguais nos dois casos); porém, os desgastes foram excessivos. Além disso, a usinagem da primeira face com quatro insertos de cerâmica foi descartada, pois o sistema estaria superdimensionado. Assim, para alcançar o desempenho desejado, foi necessário utilizar um suporte com quatro insertos de metal-duro e com três insertos de cerâmica, sendo estes os valores mínimos para quantidade de insertos para realizar a usinagem proposta. Ferramentas com estas mesmas configurações foram usadas na usinagem do lote produzido pela empresa.

2.3 Máquina-Ferramenta e Parâmetros de Corte

As operações de corte foram realizadas em um centro de usinagem vertical DAHLIH modelo MCV-1020BA com rotação máxima de 8000 rpm, potência máxima de 15 HP (11,2 kW) e magazine para até 32 ferramentas [DAHLIH, 2021]. A máquina-ferramenta e a fixação da peça na mesma são mostradas na Figura 6.

Figura 6 – (a) Imagem do centro de usinagem; (b) fixação da peça na mesa.



Fonte: (a) DAHLIH (2021); (b) O autor (2021)

As características intrínsecas dos dois insertos exigem parâmetros de corte bem distintos. Enquanto os insertos de Sialon foram projetados para altas velocidades de corte sem a utilização de lubrificante, os de metal-duro com revestimento PVD não seguem a mesma especificação, sendo usado em baixas velocidades de corte com fluido em abundância. Para tal experimento, utilizou-se o fluido de corte de base vegetal *Plantacool S-Syn 2001*, diluído em água a uma concentração de 12% e aplicado a uma vazão de 1800 l/h. A Tabela 2 mostra os parâmetros utilizados para cada inserto os quais foram recomendados pelos respectivos fabricantes.

Tabela 2 – Parâmetros de usinagem utilizados no fresamento do corpo de prova.

Parâmetro	Sigla	Unidade	Tipo de Inserto	
			Metal-duro	Cerâmica
Rotação	n	rpm	191	6963
Velocidade de corte	v_c	m/min	22,8	437,5
Velocidade de avanço	v_f	mm/min	150	1200
Profundidade de corte	a_p	mm	0,3	0,3
Avanço por dente	f_z	mm/dente	0,196	0,057
Número de Passes	-	-	3	3
Lubrificrefrigeração	-	-	Abundante	A seco

Fonte: Sumitomo Tools (2021); Kennametal (2021);

2.4 Testes e Medições na Etapa 1

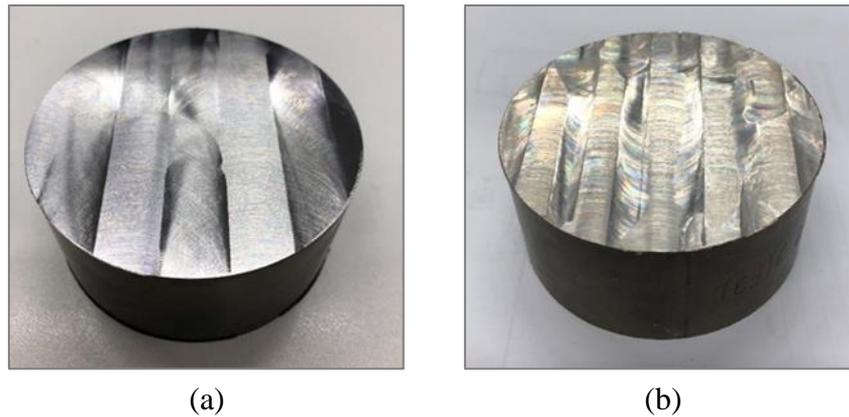
Após a usinagem nas duas faces da peça com as duas ferramentas e a produção do lote de peças, foram realizadas as inspeções de integridade no corpo de prova e a avaliação e quantificação dos desgastes dos insertos. A Figura 7 ilustra os aspectos visuais do fresamento frontal nas duas faces usinadas, onde as medições foram realizadas.

2.4.1 Medição de rugosidade

O acabamento é um dos parâmetros a serem analisados no processo de fabricação de peças usadas no setor aeroespacial, onde o dimensionamento dos componentes e a rugosidade são rigorosamente controlados. Para a medição dos parâmetros R_a e R_z nas faces usinadas, foi usado um rugosímetro

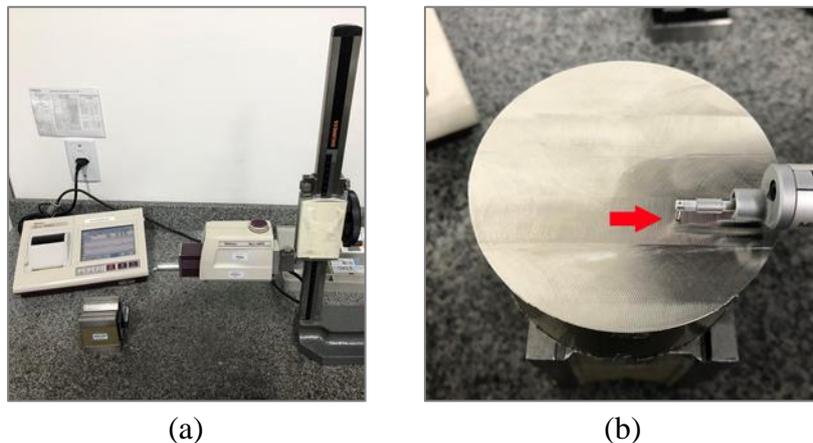
digital Mitutoyo modelo SJ 410 com agulha de raio de ponta de 4 μm , resolução de 0,0001 μm e força aplicada de 4 mN, configurado para um comprimento de amostragem de 0,8 mm, comprimento de medição de 5 mm e velocidade de varredura de 0,5 mm/s. Foram realizadas vinte medições em cada face usinada, no meio das marcas deixadas pelas ferramentas, paralelamente à direção de avanço em variados locais, totalizando quarenta medições. O sentido da medição (indicado pela seta vermelha) e o equipamento são mostrados na Figura 8.

Figura 7 – Faces da peça usinada pela ferramenta: (a) com quatro insertos de metal-duro PVD; (b) com três insertos de Sialon.



Fonte: O autor (2021)

Figura 8 – (a) Rugosímetro Mitutoyo SJ 410; (b) Sentido da medição de rugosidade.

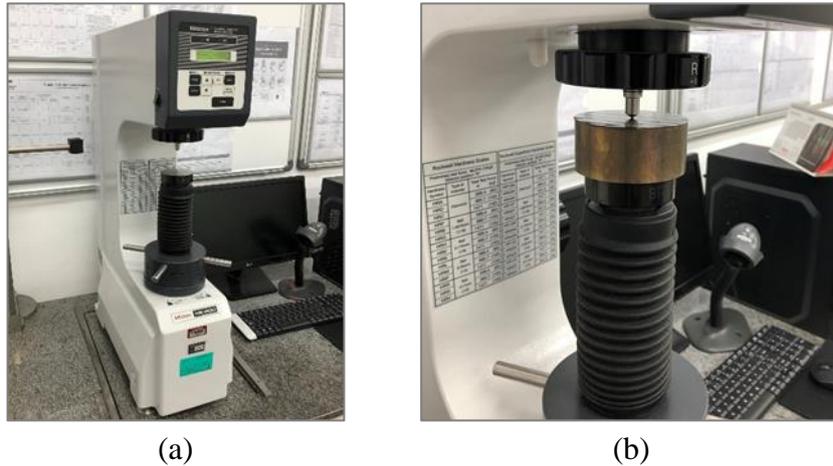


Fonte: O autor (2021)

2.4.2 Medição de dureza

Para a medição de dureza da superfície da peça antes e depois da usinagem foi utilizado um durômetro Mitutoyo modelo HR 400 com uma ponteira de diamante. O ensaio foi realizado utilizando o método Rockwell na escala C (HRC) com carga de 150 kg, totalizando vinte medições em cada face usinada. A fixação da peça e o instrumento utilizado são mostrados na Figura 9.

Figura 9 – (a) Durômetro Mitutoyo HR 400; (b) Fixação da peça no equipamento.

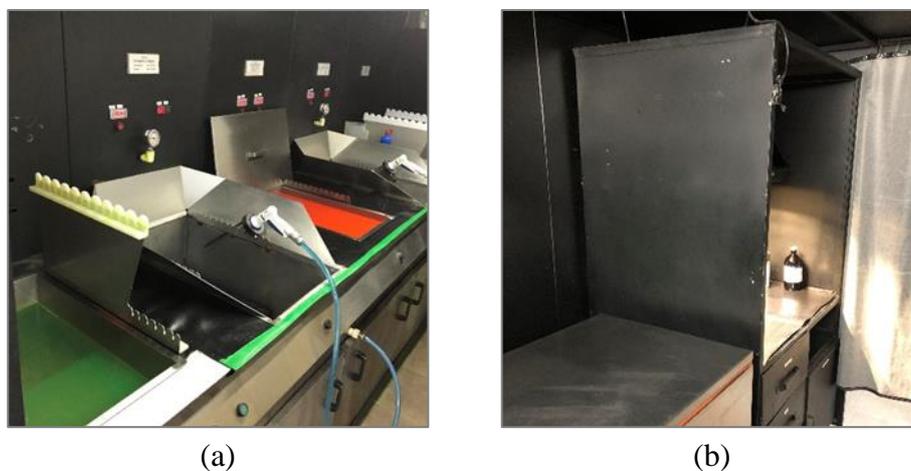


Fonte: O autor (2021)

2.4.3 Detecção de trincas superficiais

Para detectar possíveis trincas provenientes das usinagens foi realizado o teste de líquido penetrante. Entre outras características desta inspeção, o fluido penetra em falhas/trincas (se existirem) na superfície usinada e, após aplicação de uma substância reveladora, fica evidenciado sob luz negra. O nível de sensibilidade adotado no ensaio foi o médio, onde as microtrincas não são detectadas e sim apenas trincas visíveis a olho nu quando expostas ao líquido penetrante frente à luz negra. Este parâmetro de sensibilidade é justificável na medida em que as peças fabricadas são utilizadas em um sistema secundário de aeronaves, como no ar condicionado. Em peças fabricadas a partir do mesmo material, mas utilizados em sistemas críticos (ex. turbinas), o END prevê níveis de sensibilidade maiores, sendo mais rigorosos quanto ao surgimento de trincas e microtrincas provenientes de usinagens. Estes e outros parâmetros de ensaios, assim como os procedimentos adotados, estão presentes na norma ASTM E1417 (*Liquid Penetrant Inspection*). A Figura 10 mostra as imagens da estrutura de preparo e da bancada de inspeção.

Figura 10 – (a) Estrutura de preparo da peça; (b) Bancada de inspeção da peça.



Fonte: O autor (2021)

2.5 Teste e Medição na Etapa 2

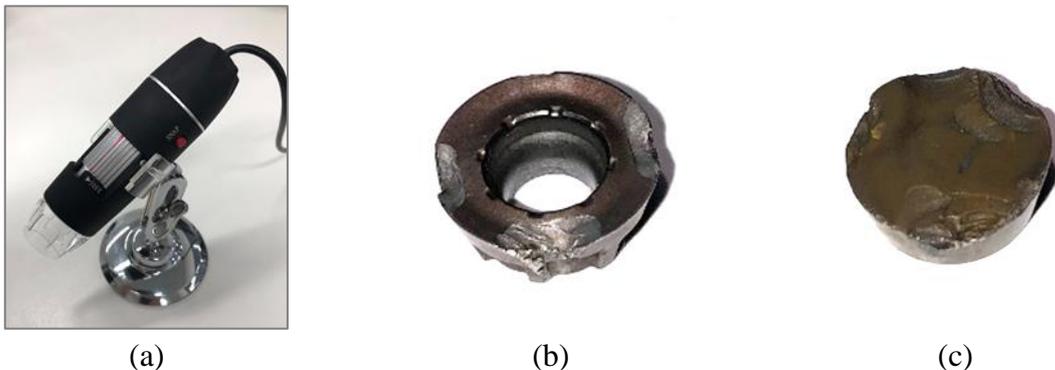
Durante a experimentação da Etapa 2 (usinagem do lote de peças) foram utilizadas quatro arestas de corte de cada inserto, ou seja, quando os mesmos falhavam ou desgastavam a ponto de não atender o resultado esperado (dimensional da peça), o inserto era rotacionado em 90°, sendo utilizada uma nova aresta de corte.

Para a ferramenta composta por insertos de metal-duro PVD, a montagem de quatro insertos (portanto, quatro arestas de corte) foi utilizada na usinagem de uma peça antes de ser rotacionada. Para a ferramenta constituída por insertos de cerâmica Sialon, a montagem de três insertos (logo, três arestas de corte) foi capaz de usinar duas peças até o momento de ser substituída por um novo conjunto de arestas (rendimento 62,5% superior).

2.5.1 Medição dos desgastes

Como mencionado anteriormente, verificou-se as falhas (desgastes e avarias), a vida dos insertos e o tempo de usinagem na produção de um lote de 10 peças para cada ferramenta de corte. A avaliação de vida útil dos insertos é de suma importância na análise do custo-benefício, pois, através desta, pode-se verificar o número de insertos necessários para produzir um determinado número de peças. Para a avaliação dos desgastes, utilizou-se um microscópio digital USB Novacom com ampliação entre 50 e 500x, mostrado na Figura 11a, dispendo de software dedicado do próprio fabricante, e conectado a um computador para a captura das imagens com ampliação de 300x. As Figuras 11b e 11c ilustram as imagens das ferramentas após realizadas as operações de corte.

Figura 11 – Medição dos desgastes: (a) Microscópio digital USB Novacom; (b) Estado de um inserto de metal-duro PVD após a usinagem do lote; (c) Estado de um inserto de cerâmica Sialon após a usinagem do lote.



Fonte: O autor (2021)

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

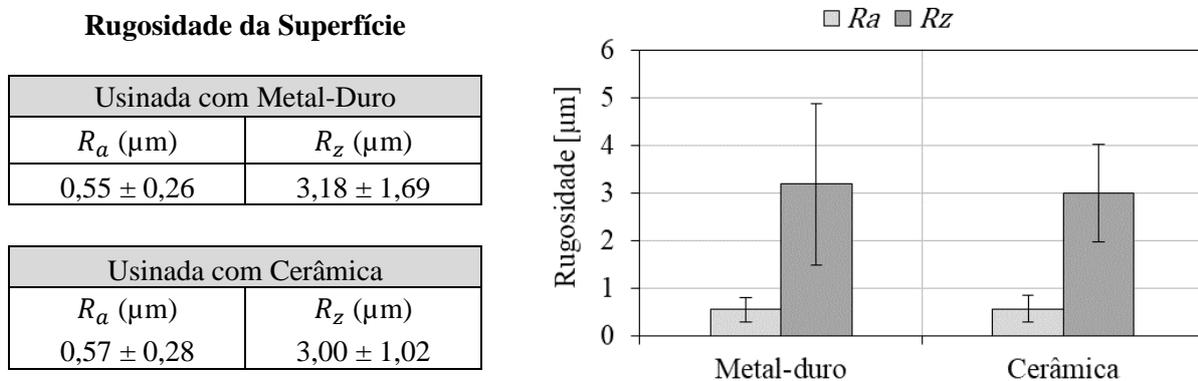
Após a finalização dos ensaios realizados no corpo de prova, o resultado gerado foi analisado a partir da avaliação da textura do material (rugosidade) e da integridade (dureza e detecção de trincas). Além disso, através da produção do lote de vinte peças fabricadas a partir do mesmo material do corpo de prova, foram analisados e quantificados os desgastes sofridos pelos insertos, o tempo de vida, o tempo total de usinagem, bem como a relação custo-benefício na utilização de cada um dos mesmos.

3.1 Rugosidade

Os valores de rugosidade R_a e R_z medidos após a usinagem das faces do corpo de prova cilíndrico são mostrados na Figura 12. Os resultados das medições (RM) são indicados pela Equação (1), em que M_i é a média dos valores encontrados, t é o valor para a distribuição *t-Student* para um intervalo de confiança de 95% e 19 graus de liberdade ($t = 2,145$), e s é o desvio-padrão da amostra de 20 medições.

$$RM = M_i \pm t \cdot s \quad (1)$$

Figura 12 – Valores de rugosidade R_a e R_z nas faces usinadas pelos insertos de metal-duro PVD e cerâmica Sialon



Fonte: O autor (2021)

Os valores encontrados, tanto em R_a quanto em R_z , (Classe de Rugosidade N6 – Apêndice) podem ser interpretados de duas maneiras (Valores típicos de R_a para determinadas aplicações – Apêndice).

1. São considerados altos quando se atribui à área do componente em questão uma condição de funcionalidade crítica dentro do sistema em que este é empregado. No caso, valores máximos de rugosidade iguais a $0,2 \mu\text{m}$ (R_a) e $2,0 \mu\text{m}$ (R_z) são comumente requisitados por projetistas para estes tipos de peça (Classe de Rugosidade N4).
2. Para áreas das peças que tem por finalidade funções estruturais, estes valores são considerados baixos, visto que nestas áreas valores máximos de rugosidade iguais a $3,2 \mu\text{m}$ (R_a) e $9,0 \mu\text{m}$ (R_z) também são comumente requisitados (Classe de Rugosidade N8).

Outro ponto a ser abordado é o fato de que estes insertos são utilizados em desbastes iniciais das peças, sendo a rugosidade um parâmetro não determinístico na escolha da melhor opção de ferramenta para estes tipos de operação de corte. Outras ferramentas e processos são responsáveis por proporcionar um melhor acabamento superficial ao material.

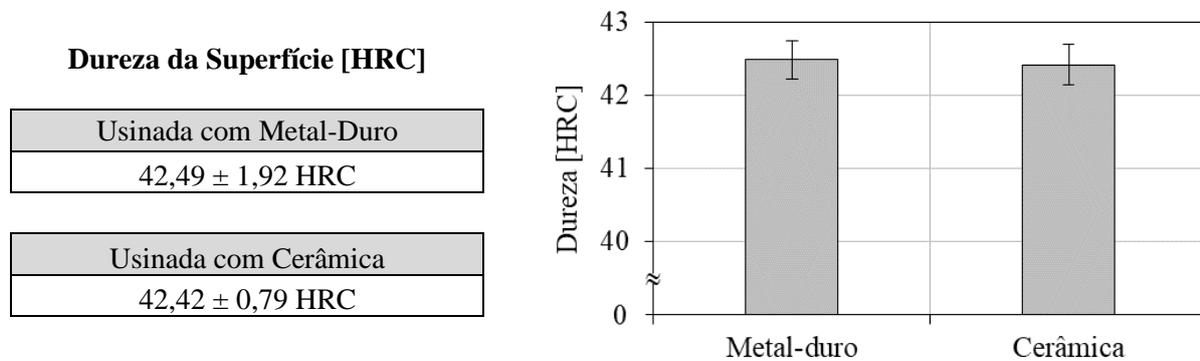
Além disso, acreditava-se que os insertos de cerâmica Sialon obtivessem um melhor acabamento na usinagem da face do corpo de prova pelos parâmetros de corte empregados (avanço por dente 70% menor e velocidade de corte 19 vezes maior). Porém, os resultados de R_a foram praticamente iguais. Provavelmente a vibração nos componentes de fixação da peça e da ferramenta devido à alta rotação aplicada na máquina-ferramenta (cerca de 90% do valor máximo) pode ter comprometido o resultado com os insertos de cerâmica, ao mesmo tempo que o revestimento PVD e a aplicação do fluido de corte podem também ter reduzido o coeficiente de atrito, favorecendo o corte e o acabamento gerado pelos insertos de metal-duro. No entanto, os valores de R_z foram ligeiramente maiores para a

usinagem com insertos de metal-duro, demonstrando que a amplitude dos picos e vales do perfil de rugosidade gerado foram maiores.

3.2 Dureza

Os valores de dureza são mostrados na Figura 13. Os resultados das medições foram calculados a partir da Equação (1) também a partir de uma amostra de 20 medições. O corpo de prova antes das operações de corte apresentava uma dureza de $43,0 \pm 0,5$ HRC e, após o fresamento frontal, esta grandeza foi modificada em menos de 3% para todos os valores encontrados de dureza nas faces usinadas. Pelos valores encontrados, pode-se afirmar que para este parâmetro, a integridade do material não foi afetada. A mudança de dureza na avaliação da integridade da peça é de fundamental importância, visto que se esta variação fosse brusca, indicaria uma mudança das propriedades mecânicas na superfície do material pós-usinagem.

Figura 13 – Valores de dureza faces usinadas pelos insertos de metal-duro PVD e cerâmica Sialon



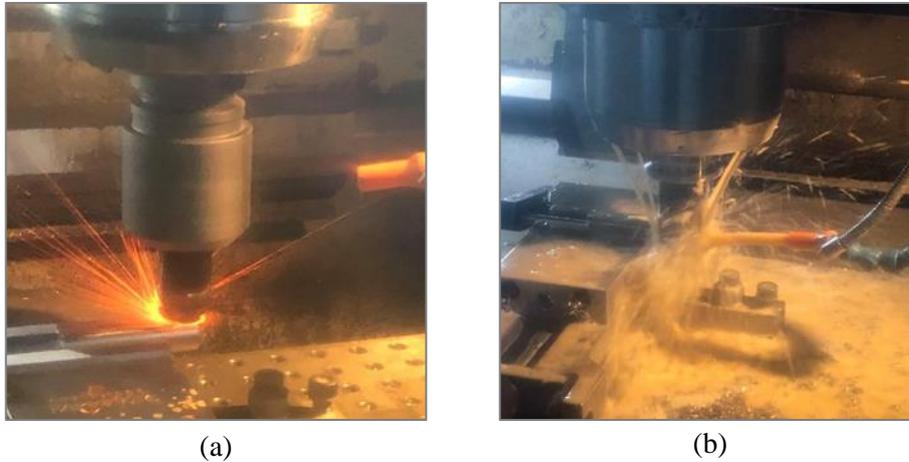
Fonte: O autor (2021)

A possível explicação para essa não alteração da dureza está atrelada ao fato de que na usinagem do material, utilizando insertos de cerâmica, há um aumento da temperatura causada pelo atrito no contato ferramenta-peça gerado pela alta velocidade de corte ($437,5$ m/min). O calor produzido é, então, absorvido em sua maior parte pelo cavaco, que é expulso da superfície usinada com auxílio de ar comprimido (Fig. 14a); no entanto, uma parcela do calor gerado vai para a peça. Esta, porém, não foi suficiente para que resultasse em recozimento da superfície e mudança significativa de dureza. No caso do fresamento com insertos de metal-duro com baixa velocidade de corte ($22,8$ m/min), as temperaturas geradas foram menores e a retirada do calor gerado foi facilitada pela aplicação de fluido de corte em abundância (Fig. 14b).

3.3 Detecção de Trincas

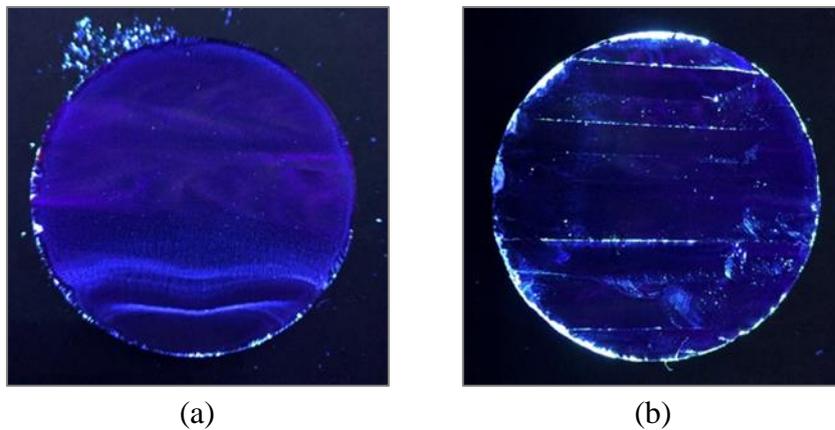
O surgimento de trincas também é um parâmetro que indica o comprometimento da integridade do material quando usinado. Pelo fato da usinagem realizada quando utilizado inserto de cerâmica ser mais agressiva em comparação com o inserto de metal-duro, o surgimento de trincas é plausível, porém o não ocorreu para os dados ensaios. As marcas evidenciadas pelo fluido revelador, como pode ser visto na Figura 15, não se aglomeram em nenhum ponto ou segmento da superfície que caracterizasse o surgimento de uma trinca, garantindo, por fim, que a integridade do material não foi afetada pelas usinagens realizadas no corpo de prova.

Figura 14 – Fresamento frontal do Inconel 718: (a) utilizando insertos de cerâmica Sialon com auxílio de ar comprimido para expulsão do cavaco; (b) usando insertos de metal-duro PVD aplicando fluido de corte em abundância.



Fonte: O autor (2021)

Figura 15 – Face usinada sob efeito do líquido penetrante e fluido revelador após fresamento frontal com ferramenta de: (a) metal-duro PVD; (b) cerâmica Sialon.



Fonte: O autor (2021)

Nas duas superfícies, nota-se um agrupamento do fluido nas extremidades da mesma, pois nestes pontos encontram-se rebarbas que não foram retiradas pós-usinagem. Na superfície usinada pelos insertos de Sialon (Fig. 15b) segmentos e pontos destacados pelo fluido revelador são observados, porém não caracterizam trincas e sim marcas de avanço provocadas pela fresa utilizada com alta v_c .

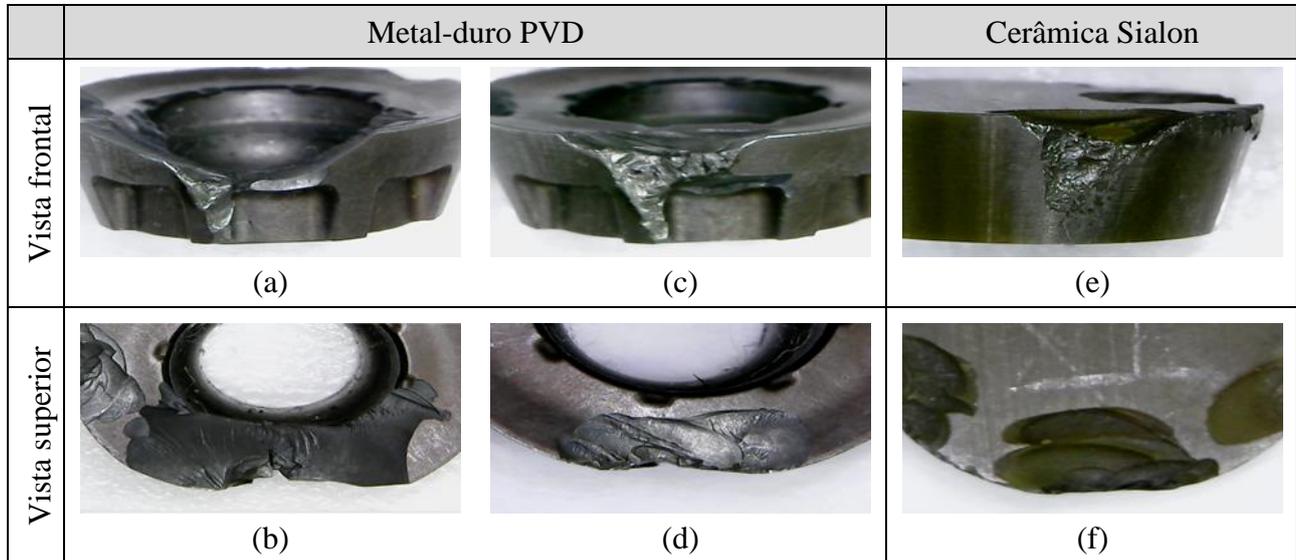
3.4 Desgastes e Vida das Ferramentas

As ferramentas utilizadas apresentaram desgastes e vida bem definidos, repetindo-se ao longo das operações de corte realizadas na fabricação do lote de vinte peças, exceto em cinco insertos de metal-duro que apresentaram falha catastrófica antes do tempo estimado de vida para os mesmos, havendo a necessidade de substituição prematura.

Os insertos de metal-duro com revestimento PVD apresentaram desgastes de flanco (vista frontal), de cratera (vista superior) e lascamentos (de 2,5 mm em média), enquanto os insertos de cerâmica

Sialon apresentaram desgastes de flanco (vista frontal) e de cratera (vista superior). A Figura 13 mostra os desgastes mencionados.

Figura 13 – Desgastes e avarias dos insertos



Fonte: O autor (2021)

3.5 Análise do Custo-Benefício

Os parâmetros relevantes para a realização de uma análise de custo-benefício dos insertos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros relevantes para análise de custo-benefício.

Inserto	Número de peças do lote	Quantidade de arestas úteis por inserto	Quantidade de insertos por suporte	Quantidade (teórica) de arestas de corte utilizadas na fabricação
Metal-Duro	10	4	4	32
Cerâmica	10	4	3	15
Inserto	Quantidade (real) de arestas de corte utilizadas na fabricação	Custo unitário por inserto (R\$)	Custo unitário para cada aresta de corte (R\$)	Custo total de aquisição dos insertos para produção do lote (R\$)
Metal-Duro	37	19,60	4,90	181,30
Cerâmica	15	74,50	18,63	279,45
Inserto	Tempo de usinagem para cada peça (min)	Tempo total de usinagem do lote (h)	Custo hora-máquina (R\$)	Custo gerado pelo uso da máquina (R\$)
Metal-Duro	45	7,5	180,65	1.354,88
Cerâmica	12	2,0	180,65	361,30

Fonte: DIGICON S.A. (2021)

Além de maior tempo necessário para a usinagem do material usando insertos de metal-duro com revestimento PVD, o tempo de montagem dos insertos no suporte também é aumentado na medida em que os mesmos apresentam falhas ou desgastes excessivos prematuramente em maior proporção quando comparados aos de cerâmica e são, naturalmente, menos produtivos (quatro arestas do inserto de metal-duro são necessárias para a usinagem de uma peça, enquanto três arestas do inserto de Sialon

usinam duas peças). Consequentemente, o maior tempo para a substituição dos insertos de metal-duro aumenta o tempo de parada de máquina e diminui a produtividade.

Como supramencionado, cinco insertos de metal-duro PVD falharam ou desgastaram excessivamente antes de completar o ciclo de usinagem programado para os mesmos, aumentando o custo total de fabricação planejado, enquanto nenhum inserto de Sialon falhou ou desgastou excessivamente a ponto de haver necessidade de troca prematura.

Através da soma do custo total de aquisição dos insertos e o custo gerado pelo uso do centro de usinagem para a produção do lote de vinte peças, pode-se chegar ao custo total associado à fabricação com cada tipo de inserto, onde os valores são exibidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Custo final associado à fabricação com as ferramentas de metal-duro e cerâmica.

Inserto	Custo total de fabricação (R\$)
Metal-Duro	1.536,18
Cerâmica	640,75

Fonte: O autor (2021)

4 CONCLUSÃO

Finalizados os experimentos e realizada a avaliação dos desgastes e do tempo de vida dos insertos de metal-duro com revestimento de PVD e de cerâmica Sialon no fresamento frontal da liga à base de níquel Inconel 718 (AMS 5663), pôde-se evidenciar que a substituição do primeiro pelo segundo não afetou a integridade do material, atestada pela pouca alteração da dureza das superfícies usinadas (menos de 3% de alteração) e o não surgimento de trincas pós-processo. Além disso, constatou-se que as qualidades das superfícies usinadas, analisadas através da avaliação da rugosidade gerada por ambas as ferramentas, não apresentaram variações significativas (as diferenças nos valores médios encontrados foram de 3,5% para R_a de 5,6% para R_z). Vale salientar que ambas, no cenário da Engenharia Aeroespacial, são recomendadas para usinagens de desbaste iniciais, e outras ferramentas próprias para acabamento devem ser utilizadas posteriormente.

Ademais, verificou-se que para a produção de 10 peças com cada tipo de ferramenta, o tempo total de produção do lote foi reduzido em 73,3% (de 7,5 para 2,0 horas), e o seu custo total de fabricação foi reduzido em 58,3% (de R\$ 1.536,18 para R\$ 640,75) quando feita a substituição proposta. Isso mostra que a utilização de insertos de cerâmica Sialon, dadas as condições apresentadas, é extremamente vantajosa no aspecto financeiro, sem prejudicar a qualidade da superfície usinada.

Para os próximos passos, recomenda-se uma análise mais aprofundada dos desgastes e dos mecanismos de desgastes atuantes nos insertos de cerâmica Sialon a fim de observar a influência dos parâmetros de corte no tempo de vida da fresa com vistas à otimização do processo de fresamento frontal do Inconel 718 (AMS 5663) aplicando este tipo de ferramenta de corte.

REFERÊNCIAS

AMS 5662, **Aerospace Material Specification**. SAE Internacional, Rev. N, p-6, 2003.

DAHLIH, DAHLIH MCV-1020BA, Disponível em:

<<https://www.wardhitech.co.uk/catalogue/mcv-1020ba-2>>. Acesso em: 20/03/2021.

Grguraš, D.; Kern, M.; Pušavec, F. “Suitability of the full body ceramic end milling tools for high speed machining of nickel based alloy Inconel 718” **Procedia CIRP**, Vol. 77, pp. 630-633, 2018.

Dudzinski, D.; Devillez, A.; Moufki, A.; Larrouquère, D.; Zerrouki, V.; Vigneau, J.; “A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy” **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 44, No. 4, pp. 439-456, 2004.

Ezugwu, E. O., Bonney, J., Silva, R. B., Machado, A. R. “Evaluation of the performance of different nano-ceramic tool grades when machining nickel-base, Inconel 718, alloy”. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Vol. 26, No. 1, pp. 12-16, 2004.

Ezugwu, E. O., Bonney, J., Yamane, Y., “An overview of the machinability of aeroengine alloys”, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 134, No. 2, pp. 233-253, 2003.

Marques, F. M.; Rocha, A. S.; et al. “Influência do processo de usinagem na integridade superficial e propriedades da liga de aço inox austenítico F138 e AISI 316L”. **9º Congresso Latino-Americano de Órgãos Artificiais e Biomateriais**, Foz do Iguaçu, PR, Ago. 2016.

IMNF. **Superligas**. Instituto de Metais Não Ferrosos, 2006. Disponível em: <www.icz.org.br/niquel-superligas.php> Acesso em 19/03/2021.

Kennametal. **Insertos Positivos Kendex**. Disponível em: <www.kennametal.com/ca/en/products/p.rpg.5090287.html>. Acesso em 15/03/2021.

Makris, K. **Airbus 340-300 Air Conditioning Pack System**. Disponível em <<https://www.k-makris.gr/cooling-pack/>> Acesso em 24/04/2021.

Leite, V. R., “Ensaio não destrutivo - aplicação por líquido penetrante”, **Revista Ciências Exatas**, Vol. 19, No. 2, pp. 27-35, 2013.

Metalinox. **Liga Inconel 718**. Disponível em: <www.metalinoxsp.com.br/liga-inconel-718>. Acesso em 19/03/2021.

Oliveira, D.; Silva, R. B.; Arencibia, R. V. “Avaliação de desvio dimensional em Inconel 718 após a retificação em diferentes técnicas de lubri-refrigeração”, **Matéria (UFRJ)**, Vol. 24, No.4, Artigo e-12481, 2019.

Santos, J. C. **Estudo do Uso de Ferramentas Cerâmicas na Usinagem de Inconel 718** Dissertação (mestrado) em Engenharia Mecânica, UNESP – Guaratinguetá, 2010.

Soares, M. C. B. V. **Influência das tensões residuais no comportamento em fadiga e fratura de ligas metálicas**. Tese (doutorado) em Ciências Nucleares, IPEN-USP, São Paulo, 1998.

Soares, R. M., **Avaliação do Comportamento dos Desgastes de Ferramentas para Torneamento da Superliga Inconel 718**. Dissertação (mestrado) em Engenharia Mecânica, UCS – Caxias do Sul, 2013.

Sumitomo Tools. **Catálogo – Insertos Intercambiáveis**. Disponível em: <www.sumitool.com/br/downloads/cutting-tools/general-catalog/assets/pdf/b_pt.pdf> Acesso em: 16/03/2021.

APÊNDICE

Tabela I – Classes de Rugosidade de acordo com a Norma ABNT NBR 8404 (1984)

CLASSE DE RUGOSIDADE	RUGOSIDADE RA (valor em mm)
N12	50
N11	25
N10	12,5
N9	6,3
N8	3,2
N7	1,6
N6	0,8
N5	0,4
N4	0,2
N3	0,1
N2	0,05
N1	0,025

Tabela II – Valores típicos de R_a para algumas aplicações – Universidade Estadual de Campinas, Tecnologia Mecânica: “Rugosidade Superficial”

$R_a = 0,01$	– blocos-padrão, réguas triangulares de alta precisão, guias de aparelhos de medida de alta precisão;
$R_a = 0,02$	– aparelhos de precisão, superfícies de medida em micrômetros e calibres de precisão;
$R_a = 0,03$	– calibradores, elementos de válvulas de alta pressão hidráulica;
$R_a = 0,04$	– agulhas de rolamentos, superacabamento de camisa de bloco de motor;
$R_a = 0,05$	– pistas de rolamentos, peças de aparelhos de controle de alta precisão;
$R_a = 0,06$	– válvulas giratórias de alta pressão, camisas de blocos de motores;
$R_a = 0,08$	– agulhas de rolamentos de grandes dimensões, colos de virabrequim;
$R_a = 0,1$	– assentos cônicos de válvulas, eixos montados sobre mancais de bronze, teflon, etc., a velocidades médias, superfícies de cames de baixa velocidade;
$R_a = 0,15$	– rolamentos de dimensões médias, colos de rotores de turbinas e redutores;
$R_a = 0,2$	– mancais de bronze, náilon, etc., cones de cubos sincronizadores de caixas de câmbio de automóveis;
$R_a = 0,3$	– flancos de engrenagens, guias de mesas de máquinas-ferramentas;
$R_a = 0,4$	– pistas de assento de agulhas de cruzetas em cardãs, superfície de guia de elementos de precisão;
$R_a = 0,6$	– válvulas de esfera, tambores de freio;
$R_a = 1,5$	– assentos de rolamentos em eixos com carga pequena, eixos e furos para engrenagens, cabeças de pistão, face de união de caixas de engrenagens;
$R_a = 2$	– superfícies usinadas em geral, eixos, chavetas de precisão, alojamentos de rolamentos;
$R_a = 3$	– superfícies usinadas em geral, superfícies de referência, de apoio, etc.;
$R_a = 4$	– superfícies desbastadas por operações de usinagem;
$R_a = 5$ a 15	– superfícies fundidas, superfícies estampadas;