

FRESAMENTO DE TITÂNIO E ALUMÍNIO AERONÁUTICOS COM ELEMENTOS FINITOS: INTEGRAÇÃO ENTRE INVENTOR CAM E NASTRAN

Samuel Augusto Soares Mania, augusto.samuel@aluno.ifsp.edu.br¹
Marcel Henrique Militão Dib, marceldib@ifsp.edu.br¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - Campus Araraquara, Rua Doutor Aldo Benedito Pierri, 250 - Jardim Paulo Freire, Araraquara - SP, 14804-296

Resumo. O foco deste trabalho é a análise da implementação de softwares integrados CAE-CAD-CAM em processos de usinagem na indústria aeronáutica, com ênfase nos materiais titânio Ti-6Al-4V e alumínio 7075-T6, amplamente utilizados nesse setor. Utilizando a integração entre os módulos Inventor CAM e Nastran, simulou-se o processo de fresamento aplicado a um bracket — componente estrutural real de sistemas de suporte de carga aeroespaciais. A metodologia compreende a geração dos percursos de usinagem via CAM, a exportação dos dados de corte e a posterior aplicação desses dados em simulações por elementos finitos com abordagem dinâmica não-linear no Nastran. Para tal, foram realizadas análises comparativas entre os dois materiais, observando-se as distribuições de tensões, deformações e esforços gerados em diferentes estágios do processo de fresamento. Os resultados obtidos permitem avaliar o comportamento mecânico das ligas durante a usinagem e fornecem subsídios para compreender seu desempenho sob condições típicas de manufatura. Com isso, o estudo contribui para o uso de simulações integradas na pré-avaliação de processos de usinagem, com potencial aplicação na otimização de parâmetros e na escolha de materiais na engenharia aeronáutica.

Palavras chave: Inventor CAM. Inventor Nastran. Fresamento. Aeronáutica. Método dos Elementos Finitos.

Abstract. This study focuses on the analysis of integrated CAE-CAD-CAM software implementation in machining processes within the aerospace industry, with emphasis on titanium Ti-6Al-4V and aluminum 7075-T6 alloys, widely used in this sector. By integrating the Inventor CAM and Nastran modules, the milling process was simulated on a bracket — a real structural component used in aerospace load-bearing systems. The proposed methodology involves generating toolpaths through CAM, exporting the cutting data, and subsequently applying this information in finite element simulations using a nonlinear dynamic approach in Nastran. Comparative analyses were conducted between the two materials, evaluating the distributions of stress, strain, and cutting forces at various stages of the milling process. The results enable assessment of the mechanical behavior of the alloys during machining and support a better understanding of their performance under typical manufacturing conditions. With that, this study contributes to the advancement of integrated simulation tools for pre-evaluation of machining processes, with potential applications in the optimization of machining parameters and material selection in aerospace engineering.

Keywords: Inventor CAM. Inventor Nastran. Milling. Aeronautics. Finite Elements Method.

1. INTRODUÇÃO

A indústria aeronáutica constitui-se como uma das mais sólidas e avançadas do mundo, com altíssimos padrões de exigência para termos de desempenho estrutural, leveza e segurança em todos os quesitos (Gloria et al., 2019). Por conta desses requisitos rigorosos, há um impulsionamento em relação à busca de utilização desde materiais apropriados como compósitos (Mane, 2023) a ligas metálicas de alto desempenho, como o alumínio 7075-T6 (Luo et al., 2021) e o titânio Ti-6Al-4V (Cieciela; Zaleski, 2022). O alumínio 7075-T6 destaca-se por sua elevada resistência mecânica, aliada à leveza e relativo baixo custo; sendo assim amplamente empregado em estruturas primárias e em componentes nos quais o peso é um fator determinante (Gloria et al., 2019). Por outro lado, o titânio Ti-6Al-4V é amplamente utilizado em aplicações críticas — como suportes estruturais e zonas sujeitas a altas tensões — devido à sua excelente resistência à corrosão e ao seu elevado desempenho mecânico, mesmo sob temperaturas elevadas (Gloria et al., 2019). Dessa forma, a indústria se vê em uma escolha criteriosa para uma aplicação estratégica desses materiais, para garantir a confiabilidade das aeronaves durante toda a sua vida útil.

Contudo, as propriedades que tornam essas ligas tão vantajosas do ponto de vista estrutural também impõem dificuldades significativas ao seu processamento, especialmente nas operações de usinagem (Marin et al., 2025); O processo de fresamento — processo amplamente adotado na fabricação de peças com geometrias complexas — apresenta desafios técnicos ao lidar com esses materiais. No caso do titânio, surgem questões como o endurecimento por trabalho, a baixa condutividade térmica e o alto atrito com a ferramenta; fatores que resultam em desgaste acelerado e aumento do risco de falhas (Cieciela; Zaleski, 2022); Já no alumínio, embora a usinagem seja mais facilitada, problemas como a formação de cavacos longos e o acúmulo de material podem comprometer a qualidade superficial (Cieciela; Zaleski, 2022). Por essas razões, torna-se essencial o planejamento detalhado das operações de fresamento, visando à eficiência do processo e à integridade da peça final, bem como eficiência e agilidade em termos industriais.

Diante desse cenário, o avanço dos sistemas computacionais modernos, mais especificamente suas aplicações à engenharia de manufatura, permitiu a integração cada vez mais complexa e sofisticada dos métodos CAD (*Computer Aided Design* ou "Desenho Assistido por Computador", em português), CAM (*Computer Assisted Manufacturing* ou "Manufatura Assistida por Computador", em português) e CAE (*Computer Assisted Engineering* ou "Engenharia Assistida por Computador", em português) (Olaru, 2022). Em paralelo a essas técnicas computacionais de engenharia e manufatura, destacam-se os softwares capazes de executar o MEF (Método dos Elementos Finitos), que consolida-se como uma ferramenta poderosa para prever o comportamento físico de peças submetidas a diferentes condições operacionais (Necpal, 2024). Entre esses programas está o Inventor, da empresa Autodesk, software próprio para CAD que, somado à integração dos módulos Inventor CAM (Autodesk, 2025a) e Nastran (Autodesk, 2025b), torna possível a geração de percursos de ferramenta baseados em parâmetros reais de usinagem e sua aplicação em simulações não-lineares; isso permite avaliar os efeitos dinâmicos do processo sobre diferentes materiais, antecipando o surgimento de tensões, deformações e esforços críticos ao longo do fresamento.

Dessa forma, este trabalho propõe a análise integrada do fresamento de um pequeno *bracket* estrutural — componente utilizado em suportes de carga aeroespaciais — por meio da associação entre os módulos Inventor CAM e Nastran. A metodologia adotada compreende a definição das estratégias de corte via CAM, a exportação dos parâmetros de usinagem e a aplicação desses dados em simulações por elementos finitos, com enfoque em análises dinâmicas não-lineares. Os testes são conduzidos para as ligas Ti-6Al-4V e 7075-T6, permitindo a comparação entre os materiais quanto ao desempenho mecânico durante a remoção de material; Assim, busca-se demonstrar o potencial das soluções integradas para a pré-avaliação de processos de usinagem, oferecendo subsídios técnicos à tomada de decisões na engenharia de fabricação aeronáutica (Tĩtu; Pop, 2024).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A indústria aeronáutica, por sua constante busca por desempenho, segurança e eficiência energética, tem demandado, cada vez mais, materiais avançados que combinem alta resistência mecânica, leveza e resistência à corrosão. Nesse contexto, destacam-se duas ligas metálicas amplamente utilizadas: o titânio Ti-6Al-4V — uma liga $\alpha+\beta$ que se sobressai por sua elevada resistência específica, baixa condutividade térmica e excelente desempenho em ambientes agressivos (Ran et al., 2020) — e o alumínio 7075-T6, uma liga tratada termicamente da série 7000, reconhecida por sua leveza, resistência à tração e usinabilidade superior (DUAN et al., 2021). Ambas são, portanto, amplamente aplicadas em peças estruturais de aeronaves, tais como frames, suportes e brackets, sobretudo em regiões críticas sujeitas a cargas cíclicas e variações térmicas severas.

Dentro da usinagem, existe o processo de fresamento, uma operação de usinagem por remoção de cavacos com múltiplas arestas cortantes, destaca-se pela sua versatilidade em peças complexas e pela capacidade de obtenção de tolerâncias dimensionais apertadas e bom acabamento superficial; Assim, essa técnica se destaca como uma das mais utilizadas para a fabricação desses componentes de alta responsabilidade estrutural (Teja; Muralikrishna, 2016). No entanto, quando se trata de ligas aeronáuticas, surgem diversos desafios operacionais: no caso do Ti-6Al-4V, por exemplo, sua baixa condutividade térmica e elevada afinidade química com a ferramenta resultam em acúmulo de calor na zona de corte, formação de aresta postiça, além da ocorrência de vibrações auto induzidas (*chatter*), que comprometem a qualidade superficial e a vida útil da ferramenta (Colakoglu, 2004); por outro lado, o alumínio 7075-T6, embora mais usinável, pode gerar cavacos longos e apresentar instabilidade térmica, exigindo também cuidados específicos no processo (Cieciela; Zaleski, 2022).

Frente a esses desafios, o avanço dos recursos computacionais tem proporcionado o uso cada vez mais frequente do Método dos Elementos Finitos (MEF) como ferramenta estratégica na simulação de operações de usinagem. Por meio desse método, torna-se possível prever com precisão o comportamento físico do material durante o corte, desde que se adotem modelos dinâmicos não lineares que levem em consideração efeitos como plasticidade, contato entre superfícies, atrito, grandes deformações e, em alguns casos, o acoplamento térmico-mecânico (Arrazola; Özel, 2010). Além disso, o uso de modelos elastoplásticos dependentes da taxa de deformação, aliados a condições de contorno transientes, permite representar com maior fidelidade as zonas de cisalhamento e os efeitos térmicos gerados na interface ferramenta-peça (Fernandes, 2019).

Diante disso, a integração de plataformas CAE-CAD-CAM — como o Inventor CAM e o Nastran — se mostra uma abordagem eficaz para estabelecer um fluxo digital coerente e produtivo, que conecta desde a concepção do

modelo geométrico, passando pela geração dos percursos de corte, até a simulação física da usinagem (Fernandes et al., 2020). O Inventor CAM, por sua vez, é responsável pela definição dos parâmetros de corte, como velocidade de rotação, avanço por dente e profundidade de passe, enquanto o Nastran executa as simulações com base nesses dados, calculando campos de tensão, deformações e, eventualmente, variações térmicas. Assim, a correta interpretação e transposição desses parâmetros para o ambiente de elementos finitos requer não apenas domínio técnico sobre a usinagem, mas também um bom entendimento sobre modelagem numérica e simulações computacionais (Tĩtu; Pop, 2024).

Por fim, o estudo das forças envolvidas no fresamento e da forma como elas se distribuem ao longo do tempo permite não apenas analisar o desempenho do processo, mas também otimizar a escolha de ferramentas e parâmetros de corte (Neugebauer et al., 2011). A seleção adequada entre fresas do tipo *flat end*, *ball nose* ou *corner radius*, aliada ao uso de materiais de ferramenta como metal duro revestido, por exemplo, impacta diretamente na estabilidade do corte e na durabilidade da ferramenta. Nesse sentido, diversos estudos têm reforçado a importância das simulações integradas como suporte à tomada de decisão no planejamento de processos de manufatura avançada.

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho baseou-se na integração entre os ambientes de modelagem e simulação do Autodesk Inventor, por meio de seus módulos CAM e Nastran, com o objetivo de realizar uma análise comparativa do processo de fresamento em materiais aeronáuticos — especificamente o titânio Ti-6Al-4V e o alumínio 7075-T6. O procedimento foi dividido em três grandes etapas:

- Preparação dos modelos;
- Definição dos parâmetros de usinagem e ferramentaria para CAM;
- Configuração e aplicação das simulações por elementos finitos.

3.1. Preparação dos modelos 3D

Como componente real da indústria aeroespacial, foi selecionado um modelo de bracket estrutural utilizado em sistemas de suporte de carga do foguete Atlas V, disponível em domínio público no site GrabCAD (Baker, 2016). O modelo 3D foi importado e tratado no Autodesk Inventor, sendo modificado para um aumento proporcional de 70%, respeitando a escala real de ter aproximadamente 10 centímetros, e separado para que houvesse apenas um modelo do bracket (o modelo original vinha com dois), conforme apresentado na Fig. 1 a).

Para a simulação no Nastran, foram utilizados dois modelos 3D de ferramentas de fresamento, selecionados conforme os parâmetros previamente definidos no módulo CAM (ver Tab. 1). A primeira ferramenta, do tipo *flat end* (Fig. 1c)), foi obtida na plataforma GrabCAD (Slanda, 2025), apresentando geometria compatível com as configurações estabelecidas para o processo de usinagem. A segunda, do tipo *ball end* (Fig. 1 b)), corresponde a um modelo da marca Guhring (TraceParts, 2025), e passou por um redimensionamento proporcional de 40% em relação à versão original, a fim de se adequar às especificações determinadas. Ambas as ferramentas foram validadas em termos de material, diâmetro e número de flautas, atendendo aos requisitos do estudo.

Embora o planejamento da simulação CAM tenha considerado três geometrias distintas de ferramentas (*flat end*, *ball end* e *bull-nose*), cada uma para uma finalidade diferente dentro da operação completa de fresamento, a etapa de simulação por elementos finitos no Inventor Nastran foi realizada com apenas duas delas — *flat end* e *ball end* — devido à indisponibilidade de modelos 3D compatíveis com a *bull-nose*. Essa decisão foi adotada de forma consciente, priorizando a continuidade do estudo e a análise comparativa entre os materiais.

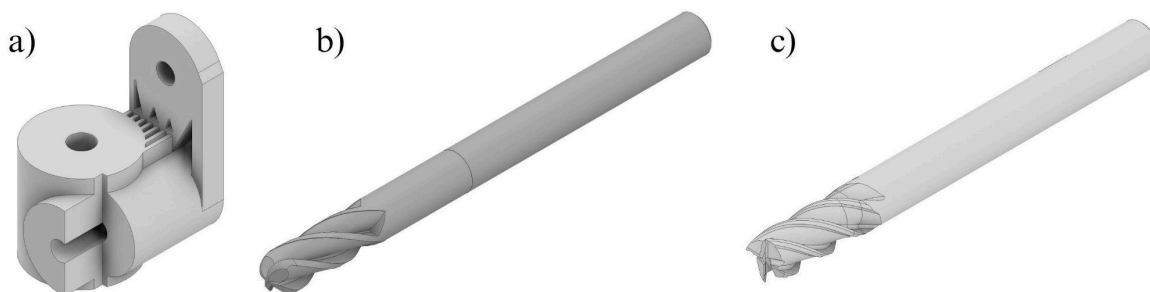


Figura 1 a). Modelo 3D do bracket estrutural adaptado em CAD. | b) Ferramenta ball end redimensionada. | c) Ferramenta flat end. (Fonte: Elaborado pelo autor).

3.2. Definição dos parâmetros de usinagem e de ferramentaria para CAM

Em seguida, foi preparada a usinagem 3D do modelo no módulo CAM do Inventor. Inicialmente, na configuração Setup, foi criada uma caixa com as medidas da peça, somando-se 3 milímetros em altura, comprimento e largura, representando o bloco original do modelo tanto para titânio quanto alumínio. Partindo então para o desenvolvimento das configurações das ferramentas utilizadas, os parâmetros selecionados estão dispostos na Tab. 1, baseados em Manufacturing Engineering and Technology (Kalpakjian; Schmidt, 2004).

Tabela 1. Parâmetros das ferramentas CAM para as operações de fresamento. (Fonte: Elaborado pelo autor).

Parâmetro	Flat End Mill	Ball End Mill	Radius End Mill
Diâmetro (mm)	6	4	6
Shoulder Length (mm)	18	16	16
Flute Length (mm)	15	12	14
Body Length (mm)	45	40	45
Overall Length (mm)	60	55	60
Shaft Diameter (mm)	6	4	6
Material	Carbide	Carbide	Carbide
Shaft Height (mm)	20	20	20
Shaft Ø Superior (mm)	6	4	6
Shaft Ø Inferior (mm)	6	4	6
Altura do Porta-Fresa	20	18	20
Ø Sup. Porta-Fresa (mm)	20	20	20
Ø Inf. Porta-Fresa (mm)	12	10	12
Velocidade de Giro (RPM) – Titânio	3500	4000	3000
Velocidade de Giro (RPM) – Alumínio	9000	9500	8500
Avanço de Corte (mm/min) – Titânio	120	100	100
Avanço de Corte (mm/min) – Alumínio	400	350	380
Número de Cortes (Flutes)	4	4	4
Rotação	Horário	Horário	Horário

Aplicados os parâmetros de ferramenta, foram então elaboradas 6 etapas no processo de fresamento, baseadas em diferentes operações que o software é capaz de executar. Em cada figura é possível ver qual ferramenta foi usada para qual operação:

- A etapa descrita na Fig. 2. a) refere-se à ferramenta Adaptive, que gera um desbaste inicial segundo os eixos de orientação selecionados para a ferramenta;
- Na Fig 2. b), foi utilizada a operação Pocket, para remoção de material restante;
- Na fig. 2. c) a operação Contour foi aplicada com o intuito de executar um semi-acabamento na peça;
- A Fig. 2. d) apresenta a operação Scallop, com o objetivo de aplicar mais desbaste em regiões mais íngremes no modelo;
- Na Fig 2. e) está a operação Pencil, focada em usinagens de cantos interligados à curvatura;
- Por fim, foi executada mais uma operação Adaptive em outro sentido de orientação nos eixos da ferramenta, de maneira a usinar partes que a ferramenta no sentido anterior não alcançaria, apresentado na Fig. 2. f).

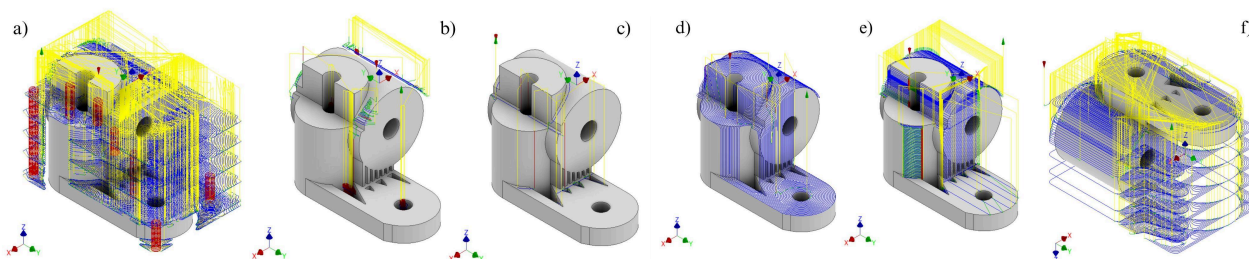


Figura 2. a) Operação Adaptive. | b) Operação Pocket | c) Operação Contour. | d) Operação Scallop. | e) Operação Pencil. | f) Operação Adaptive no sentido inverso da peça. (Fonte: Elaborado pelo autor.)

3.3 Configurações e aplicação das simulações por elementos finitos

As operações de usinagem permitiram definir trajetos realistas para o posicionamento das ferramentas 3D no Inventor Nastran, bem como seu posicionamento adequado no módulo *Assembly* (junção) do Inventor padrão, possibilitando a extração de dados condizentes com situações práticas. A ferramenta flat end seguiu o trajeto da operação na Fig. 2 a), enquanto a ball end seguiu o trajeto da Fig. 2 d).

A simulação foi conduzida em um notebook Lenovo IdeaPad Flex 5i, com 8 Gb de RAM, no critério *Nonlinear Transient Response* (Resposta Não-Linear Transiente) para a operação da ferramenta flat end, e *Linear Static* para a ball end, permitindo resultados de diferentes tipos de simulação do Nastran. Utilizaram-se elementos parabólicos com refinamento nas regiões de contato, mantendo-se um *aspect ratio* de 0,6, assim permitindo um controle de distorções volumétricas na malha. O número total de elementos foi dimensionado para simulações de médio porte.

O material da ferramenta foi definido como carbetto de tungstênio, conforme a etapa CAM, com propriedades físicas atribuídas manualmente (Kalpakjian; Schmidt, 2004), enquanto o componente usinado (bracket) foi avaliado com as ligas Al 7075-T6 e Ti-6Al-4V em simulações separadas segundo os parâmetros padrões do próprio Nastran.

Nas condições de contorno, a peça foi fixada na base nos seis graus de liberdade e a ferramenta recebeu forças aplicadas baseadas nos parâmetros da Tab. 1 e segundo a Eq. 1, tomando-se o ângulo de ataque = 45° para as ferramentas do tipo flat end. Para as simulações com ferramentas ball end, utilizou-se um ângulo estimado de 71,6°, de modo a refletir melhor a inclinação efetiva do esforço resultante sobre a região curva de contato da ferramenta. Em ambos os casos, inverteu-se o sentido da força em X para manter a coerência com a modelagem 3D. Para estabilidade numérica, aplicou-se amortecimento Rayleigh de baixa intensidade. Os parâmetros completos estão dispostos na Tab. 2; as etapas são ilustradas na Fig. 3.

$$F_c = K_c \cdot ap \cdot ae \quad (1)$$

Onde: K_c = coeficiente de corte (N/mm²), do Titânio (Ti-6Al-4V): **1800 N/mm²** e do Alumínio (7075-T6): **700 N/mm²**, ap = profundidade de corte = **0,5 mm** e ae = largura de corte = **50% do diâmetro da ferramenta**.

Tabela 2. Parâmetros da simulação no módulo Nastran (Fonte: Elaborado pelo autor).

Categoria	Parâmetro	Valor/Configuração
Tipo de análise	Modelo adotado	Nonlinear Transient Response
	Análise dinâmica / Estática Linear	Sim (tempo real de usinagem segmentado)
Malha	Tipo de elemento	Parabólico
	Tamanho médio de elemento	3 mm nos modelos/ 0,5 mm nas zonas críticas
	Refinamento local	Na interface ferramenta/bracket
	<i>Aspect ratio</i> máx.	0,6
Material da ferramenta	Nome	Carbeto de Tungstênio (WC-Co)
	Módulo de Young (E)	650 GPa
	Poisson (ν)	0,23
	Densidade	14.8 g/cm ³
	Condutividade térmica	90 W/m·K
	Resistência compressiva	5000 MPa
Condições de contorno	Fixação da fresa	Base superior fixa (permite rotação)
	Fixação do bracket	Superfície superior restrita
	Coeficiente de atrito	Alumínio = 0,2/ Titânio = 0,4
Forças Aplicadas	Flat End: Ti-6Al-4V	F _x = -1909 N F _y = 1909 N
	Ball End: Ti-6Al-4V	F _x = -636,5 N F _y = 1909,5 N
	Flat End: 7075-T6	F _x = -742 N F _y = 742 N
	Ball End: 7075-T6	F _x = -221,3 N F _y = 664,1 N
Outros parâmetros	Amortecimento estrutural	Rayleigh: α = 0.01, β = 0.0005
	Tempo total de simulação	1 s

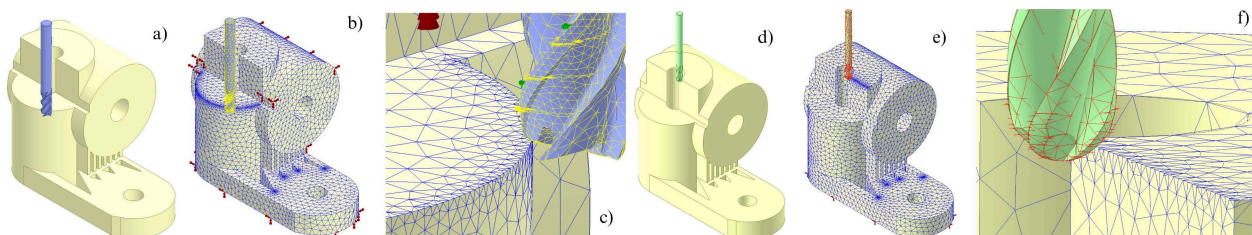


Figura 3. a) Junção bracket + flat end. | b) Malha bracket + flat end. | c) Interface bracket + flat end. | d) Junção bracket + ball end. | e) Malha bracket + ball end. | f) Interface bracket + ball end. (Fonte: Elaborado pelo autor.)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a etapa de CAM, o resultado final do processo está disponível na Fig. 4, onde é possível se compreender que as operações aplicadas garantem que é possível obter resultados interessantes tanto no quesito de desbaste quanto de acabamento da peça. Entretanto, o fato de não ter sido possível aplicar as operações em sentidos de orientação diferentes, o que permitiria que as ferramentas usinagem outras partes do bloco original, acabou resultando em uma operação incompleta. Essa conclusão apresenta-se na Fig. 4, demonstrando ângulos diferentes da peça após a usinagem, e a barra de tempo da simulação, que identificou diversos erros de percurso (marcados em vermelho), majoritariamente apontando que o suporte da ferramenta esbarrava na peça, cenário muito perigoso na vida real.

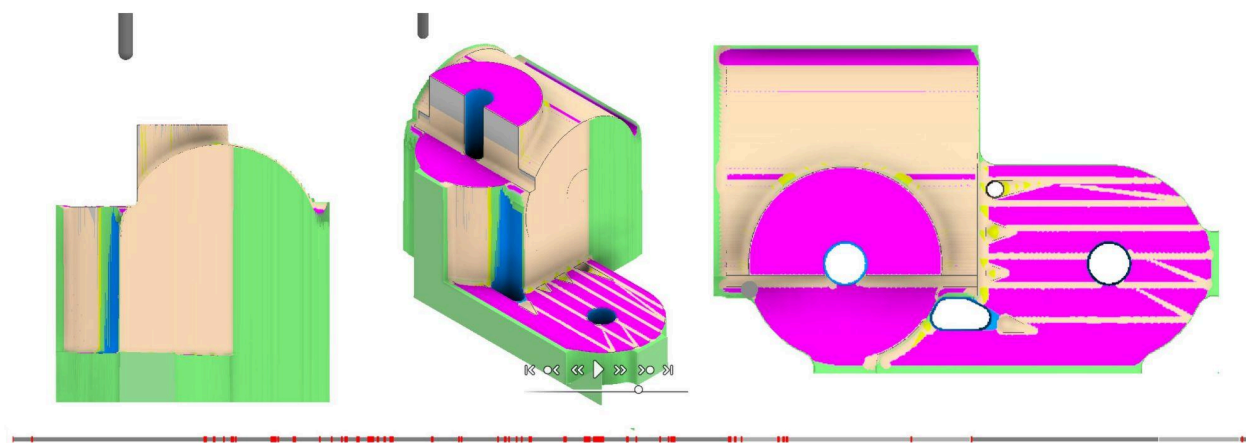


Figura 4. Resultado da simulação de usinagem, com vistas frontal, isométrica e superior (da esquerda para a direita), e a barra de tempo da simulação abaixo. (Fonte: Elaborado pelo autor.)

Já para a etapa de simulação numérica no Nastran, os resultados seguem conforme a Tab. 3, apresentando as diversas variáveis cujos valores foi-se possível obter, onde cada uma das 4 simulações levou aproximadamente 10 minutos para ser finalizada; A representação visual dos resultados após as simulações estão dispostas as Fig. 5 a) e b).

Tabela 3. Resultados das simulações no módulo Nastran (Fonte: Elaborado pelo autor).

	Ferramenta	Tipo de Simulação	Tensão de Von Mises	Velocidade	Deformação Sólida Efetiva	Deslocamento	Força aplicada
Ti-6Al-4V	Flat End	Nonlinear Transient Response	-	0,05 mm/s	2,581	0,255 mm	86,755 N
7075-T6	Flat End	Nonlinear Transient Response	-	0,02 mm/s	1,027	0,1 mm	34,085 N
					Deformação Sólida Elástica		
Ti-6Al-4V	Ball End	Linear Static	184869,25 Mpa	-	1,463	2630,962 mm	1345,877 N
7075-T6	Ball End	Linear Static	55041,793 MPa	-	0,189	16.634.450 mm	528,607 N

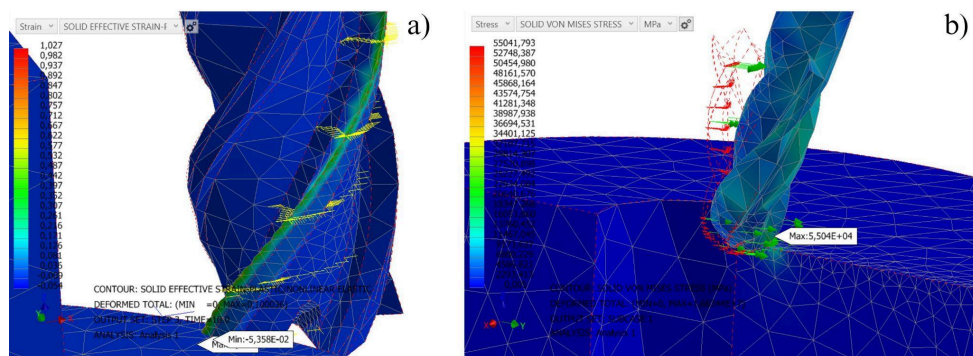


Figura 5. a) Resultado de deformação sólida efetiva nas operações com a ferramenta flat end. | b) Resultado da tensão de Von Mises nas operações com a ferramenta ball end.

A ausência de experimentos práticos dificulta a conclusão objetiva da utilidade dos resultados das simulações do Nastran, entretanto, é possível inferir que com base nas literaturas utilizadas neste trabalho, algumas variáveis tiveram resultados curiosos; Em especial, a ausência de valores para a tensão de Von Mises, e a deformação e forças resultantes obtidas nas simulações da ferramenta flat end, que ficaram bastante baixas. Esse valor pode ser coerente deve ao intervalo de tempo analisado ser bem pequeno (apenas 1 segundo), se comparado à simulação com a ball end, que não possui critérios de não-linearidade ou transiência e por isso obteve valores bastante superiores, porém aceitáveis considerando a durabilidade dos materiais envolvidos.

Contudo, a simulação de estática linear também gerou resultados extremos se comparado à simulação transiente da flat end no quesito de deformação, gerando o equivalente a quilômetros de deformação na ferramenta e na peça, resultado completamente absurdo se comparado com qualquer experimento real ou mesmo com as aplicações industriais mais comuns.

Assim sendo, é possível inferir que ambas as simulações tiveram seus pontos fortes e fracos, e uma aplicação industrial na área da aeronáutica ainda precisaria definir melhor tanto os critérios das condições de contorno, bem como o tipo de análise aplicável para se obter os melhores resultados para futuros usos.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados e nas metodologias utilizadas, conclui-se que o Inventor, em seus módulos CAM e Nastran, propõe-se como uma ferramenta com potencial para aplicações mais simples, mas exigiria bastante tempo e testes para poder ser validado em uma aplicação de altíssima complexidade e nível de qualidade como os que a indústria aeronáutica exige. Essa avaliação torna-se ainda mais aceitável quando se leva em consideração que ainda seriam necessários dados como os da área térmica, mais especificamente de transferência de calor, que são úteis na seleção de materiais para ferramentas e peças. Mesmo levando em conta que o Nastran possui tipos de simulação voltadas à térmica, estas ainda precisam de testes para sua implementação nesse tipo de indústria.

Contudo, vale-se mencionar que mesmo que possa haver discrepâncias ou exageros nos resultados obtidos para esta pesquisa, a versatilidade das ferramentas CAM e Nastran permite que ela possa ser aplicada em outras áreas, mais especificamente à área acadêmica, trazendo boas noções para estudantes no conhecimento de diversos conceitos complexos e como eles podem afetar nas indústrias modernas. Assim, é possível concluir que as ferramentas CAD CAM e CAE do Inventor, embora talvez não sejam as mais adequadas em conjunto para fins de aeronáutica de alto nível, ainda são ótimas para fins didáticos, e é difícil definir o quanto elas ainda podem agregar positivamente tanto para a indústria quanto para a ciência.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARRAZOLA, P. J.; ÖZEL, T. Investigations on the effects of friction modeling in finite element simulation of machining. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 52, n. 1, p. 31–42, jan. 2010.
- AUTODESK. Autodesk CAM. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/inventor-cam/overview>. Acesso em: 20 abr. 2025a.
- AUTODESK. Autodesk Inventor Nastran Software. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/inventor-nastran/overview>. Acesso em: 20 abr. 2025b.
- BAKER, S. Aerospace Bracket | 3D CAD Model Library | GrabCAD. Disponível em: <https://grabcad.com/library/aerospace-bracket-1>. Acesso em: 21 abr. 2025.
- CIECIELAĞ, K.; ZALESKI, K. Milling of Three Types of Thin-Walled Elements Made of Polymer Composite and Titanium and Aluminum Alloys Used in the Aviation Industry. *Materials*, v. 15, n. 17, p. 5949, 28 ago.

2022.

COLAKOGLU, M. Factors Effecting Internal Damping in Aluminum. 2004.

FERNANDES, F. A. O. et al. Integrating CAD/CAE/CAM in Engineering Curricula: A Project-Based Learning Approach. *Education Sciences*, v. 10, n. 5, p. 125, 28 abr. 2020.

FERNANDES, R. I. M. A. Obtenção das forças de usinagem utilizando o modelo de Jhonson-Cook. [s.l.] Universidade de Brasília, 2019.

GLORIA, A. et al. Alloys for Aeronautic Applications: State of the Art and Perspectives. *Metals*, v. 9, n. 6, p. 662, 6 jun. 2019.

KALPAKJIAN, S.; SCHMIDT, S. Manufacturing Engineering and Technology. 4. ed. [s.l.: s.n.].

LUO, H. et al. Numerical Simulation and Experimental Study on the Drilling Process of 7075-t6 Aerospace Aluminum Alloy. *Materials*, v. 14, n. 3, p. 553, 24 jan. 2021.

MANE, S. Review Study on Finite Element Analysis Method Used for Aerospace Structure Applications. v. 10, n. 1, 2023.

MARIN, F. et al. Dimensional errors of aeronautical casings caused by machining of thin walls and features. *Results in Engineering*, v. 26, p. 104719, jun. 2025.

NECPAL, M. Advancing Machining Manufacturing: A Comprehensive Evaluation of Finite Element Method Simulation for Cutting Processes. *Mathematical Modeling*, n. 1, 2024.

NEUGEBAUER, R. et al. Velocity effects in metal forming and machining processes. *CIRP Annals*, v. 60, n. 2, p. 627–650, 2011.

OLARU, I. Software Integration Type CAD-CAM-CAE in Product Lifecycle Management. *Journal of Engineering Studies and Research*, v. 28, n. 2, p. 57–61, 1 set. 2022.

RAN, J. et al. Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Fabricated by Electron Beam Melting. *Crystals*, v. 10, n. 11, p. 972, 27 out. 2020.

SLANDA, S. 4 flute flat endmill | 3D CAD Model Library | GrabCAD. Disponível em: https://grabcad.com/library/4-flute-flat-endmill-1/details?folder_id=1385623. Acesso em: 24 abr. 2025.

TEJA, N. R. S.; MURALIKRISHNA, G. B. CAD/CAM Interaction with High Speed Machinery. 2016.

ȚÎȚU, A. M.; POP, A. B. Implementation of CAD/CAM/CAE Systems for Improved Design and Manufacturing Processes in Industrial Organizations. *Proceedings of the International Conference on Business Excellence*, v. 18, n. 1, p. 3069–3078, 1 jun. 2024.

TRACEPARTS. GUHRING - Free CAD models - Solid carbide HSC radius milling cutters, Ball nose end mills (4-fluted) - 3306/3727 - TraceParts. Disponível em: <https://www.traceparts.com/en/product/guhring-solid-carbide-hsc-radius-milling-cutters-ball-nose-end-mills-4fluted-33063727?CatalogPath=TRACEPARTS%3ATP02006002009&Product=10-01092022-114686>. Acesso em: 24 abr. 2025.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.