

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CREEPFEED PARA REDUÇÃO DE RISCOS DE FALHA DE PALHETAS ROTATIVAS NO SETOR AERONÁUTICO – UM ESTUDO DE CASO.

Francisco Meira
Mechanical Engineer
Companhia Eletromecânica Celma, General Electric (GE)
Address: R. Alice Hervê, 356, Petrópolis, RJ, 25669-900
Email: francisco.meira@ge.com

Renato Portugal (Corresponding author)
D.Sc. Physics (1988)
Current address: Universidade Católica de Petrópolis, Rua Barão do Amazonas 124,
Petrópolis, RJ, 25685-100, Brazil
Email: renato.portugal@ucp.br or portugal@lncc.br

José Cristiano Pereira,
D.Sc. Mechanical engineering.
Fluminense Federal University, UFF, Brazil.
Current address: Universidade Católica de Petrópolis, Rua Barão do Amazonas 124,
Petrópolis, RJ, 25685-100, Brazil
Email: josecristiano.pereira@ucp.br

ABSTRACT

As consequências e custos de um componente fraturado, trincado ou em mal funcionamento são indesejáveis, perigosos e custosos de uma forma geral, às empresas. Na indústria aeronáutica especialmente, o assunto ganha uma importância significativa por razões óbvias. Uma falha pode ser catastrófica e resultar em perdas econômicas e principalmente de vidas.

O empenho dos fabricantes e das reparadoras de motores aeronáuticos é contínuo na prevenção de incidentes e acidentes com foco no aumento da confiabilidade dos processos. É requerido, por parte dos técnicos e engenheiros, um conhecimento profundo dos diversos processos de transformação e reparos de componentes e seus impactos no comportamento e funcionamento destas peças em voo. Os diversos processos mecânicos, químicos, térmicos e termoquímicos devem sempre produzir resultados previsíveis nos componentes resultando sempre em ganho de qualidade e durabilidade, entretanto, efeitos adversos podem ocorrer se a técnica adequada não for empregada.

Uma das formas de falha de uma peça aeronáutica é por fratura com perda de material. Uma trinca pode surgir a partir de diversos processos, tais como soldagem, tratamento térmico, usinagem, além da operação normal do motor. No presente trabalho o objetivo é abordar os principais parâmetros da usinagem através do processo de retificação creepfeed e como podemos atuar na prevenção de trincas resultantes de aquecimento e refrigeração brusca durante o reparo de palhetas rotativas aeronáuticas.

1. INTRODUÇÃO

A retificação é um dos processos de usinagem mais versáteis e tem como objetivo produzir peças com alta precisão geométrica e dimensional. O processo de retificação creep feed é altamente aplicado na indústria da aviação em materiais de baixa usinabilidade tais como Inconel,

1 Francisco Meira, Engenheiro Mecânico – General Electric - Aviation

2 José Cristiano – D.Sc, Engenheiro Mecânico - Universidade Católica de Petrópolis

3 Renato Portugal – D.Sc, Físico – Universidade Católica de Petrópolis

Hastelloy, René, e outras ligas. Os principais fatores esperados desta tecnologia são alta qualidade da superfície usinada e alta produtividade. Para atender às demandas globais de competitividade, é utilizado cada vez mais parâmetros de corte agressivos que reduzem o tempo de fabricação, mas ao mesmo tempo, induzem calor e tensões mecânicas na região retificada. Uma alta taxa de troca de calor é mandatória como forma de preservação das propriedades mecânicas do material e prevenção de problemas de qualidade.

O ambiente global mais competitivo desafia as indústrias a melhorar a qualidade e produtividade e a busca por melhores métodos produtivos é uma tarefa diária. Rowe [1] observou que avanços nem sempre são obtidos a partir da mudança de uma única variável na retificação, mas normalmente por uma combinação de mudanças que afeta diversas variáveis. O desenvolvimento de máquinas comandadas por Controle Numérico Computadorizado (CNC) e de rebolos de Nitreto Cúbico de Boro (CBN) requerem um completo entendimento da hidrodinâmica da refrigeração e da influência dos parâmetros de corte para se obter a maior produtividade possível.

2. MÉTODO

Este estudo de caso foi conduzido na forma de se obter resposta para duas questões importantes: (1) Quais são os fatores chave que influencia no rendimento de um processo de retificação por creep feed, e (2) Como a compilação de diversos trabalhos publicados, geram o aumento de produtividade e de confiabilidade em processos de retificação creep feed.

Primeiramente, 20 trabalhos relacionados com o tema e relevantes foram selecionados de vários Journals e todas as informações importantes de cada trabalho foram coletadas. Em segundo lugar, cada informação e recomendação dos autores foram avaliadas quanto à contribuição para o estudo de caso. Em terceiro lugar, foi selecionado o método de fabricação dos bicos refrigerantes e material. Em quarto lugar, os bicos refrigerantes foram projetados e testados em ambiente computacional. Em quinto lugar, os bicos foram construídos em impressora 3D. Em sexto lugar, os bicos refrigerantes foram testados em lote de teste e por último, os resultados foram avaliados e comparados com o processo preexistente para determinação dos benefícios técnicos e econômicos. Este estudo desafia a aplicabilidade dos conceitos publicados para solucionar problemas práticos, tais como produtividade, altos custos de produção e danos na integridade superficial dos materiais.

Em várias publicações selecionadas, observou-se que os pesquisadores simplificaram os problemas utilizando amostras planas ou com baixa complexidade geométrica. Na maioria dos casos, esta condição não representa os casos reais encontrados na indústria. Acredita-se que este estudo irá aumentar o conhecimento de engenheiros e técnicos em como melhorar o desempenho dos processos de retificação creep feed de forma mais assertiva. O conteúdo deste estudo resume vários trabalhos publicados que tratam diferentes perspectivas do processo de forma separada e provê um pacote de soluções para aplicação prática.

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma: Secção 1 aborda as informações introdutórias sobre os conceitos desenvolvidos e publicados pelos pesquisadores, Secção 2 discute o método de desenvolvimento da pesquisa, Secção 3 discute os resultados obtidos e a Secção 4 apresenta a conclusão e propõe desenvolvimentos futuros.

3. REVISÃO DA LITERATURA

Vários estudos recentemente publicados tratam o dano térmico causado por operações de retificação. A maioria destas publicações enfatiza que trincas e queimaduras são induzidas pelo mecanismo de remoção de material, mas podem ser minimizados quando os parâmetros de usinagem e o sistema de refrigeração são otimizados. Rowe [2] mencionou que a temperatura não é uma variável facilmente monitorada na retificação. Alternativamente, a temperatura pode ser correlacionada com valores tais como força e potência consumida pela máquina como controle de processo na prevenção de trincas e queimas nas peças. Alberdi et al. [3] observou que a forma dos bicos refrigerantes deve evitar a geração de pressão interna de estagnação e recirculação do

1 Francisco Meira, Engenheiro Mecânico – General Electric - Aviation

2 José Cristiano – D.Sc, Engenheiro Mecânico - Universidade Católica de Petrópolis

3 Renato Portugal – D.Sc, Físico – Universidade Católica de Petrópolis

fluido do óleo que geram perda de energia e redução do rendimento do jato. Velocidades não uniformes do fluido refrigerante devem ser corrigidas antes de sua introdução no ambiente de produção. O uso de Elementos Finitos – CFD (Computer Fluid Dynamics) pode revelar regiões com variações de velocidade na saída do jato. Rouly et al. [4] comprovou uma forte correlação entre a qualidade da superfície da peça e a distância entre o bico refrigerante e a região usinada. Para evitar uma rápida dispersão e aeração do fluxo, o bico deve ser posicionado o mais perto possível da área em usinagem. Para demonstrar seus resultados, foi utilizado um método envolvendo impressão 3D e ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) como material para construção dos bicos. Lopez-Arraiza et al. [5] desenvolveu e testou o rendimento de novos bicos refrigerantes utilizando como material de fabricação um polímero reforçado de fibra produzindo um jato com significativa velocidade e um fluxo mínimo. Majumdar et al. [6] aprimorou experimentalmente a lubrificação e refrigeração utilizando uma guia mecânica para direcionar o fluxo até o local de interesse. É mencionado no estudo que uma camada de ar se forma em torno do rebolo em movimento permitindo que somente 5-30% do óleo refrigerante bombeado penetre na zona de retificação. Ebbrel et al [7] examinou o efeito da camada de ar formada em rebolos de óxido de alumínio vitrificado durante a rotação. Esse efeito ocorre em altas velocidades e contribui para a deflexão da maior parte do óleo refrigerante da zona de retificação. Heinzl et al. [8] estudou a relação entre o formato da saída do bico refrigerante, as propriedades do fluxo e o efeito de limpeza em peças de teste. O autor menciona que a adesão de material no rebolo pode ser reduzida através do ajuste de parâmetros de corte, do fornecimento de óleo refrigerante e das condições do rebolo. A otimização do formato e posição do bico refrigerante pode proporcionar uma refrigeração mais eficiente, mesmo com baixa taxa de fluxo. O trabalho destacou que a pressão de estagnação do jato refrigerante em alta velocidade ($v_j > 50\text{m/s}$) pode ser calculado pela equação simplificada de Bernoulli, onde ρ_f e v_f são a densidade do fluido e a velocidade do jato, respectivamente.

$$p_s = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot v_j^2 \quad \text{Eq.(1)}$$

A colisão do fluido com o rebolo gera ondas de choque que propagam à velocidade do som e produz um efeito de martelamento na superfície causando um efeito de limpeza no rebolo. Kawalec et al. [9] examinou rebolos de CBN fabricados por eletrodeposição com diferentes velocidades e concluiu que em baixas rotações, estes rebolos apresentam uma maior intensidade de desgaste e um aumento rápido no esforço de usinagem. Ding et al. [10] analisou em detalhes a distribuição do grão de CBN, o comportamento na usinagem e a eficiência de rebolos de única camada. O modo de desgaste do rebolo monocristalino de CBN normalmente ocorre por atrito e causa perda de capacidade de corte e maiores tensões no material. Vidal et al. [11] detectou que o principal tipo de desgaste e propôs uma forma de medir este desgaste. De forma conclusiva, os grãos de CBN desgastam-se até formar uma superfície plana e perdem a capacidade de corte. Wang et al [12] desenvolveu modelos utilizando Elementos Finitos e observações experimentais para investigar o desgaste de rebolos de CBN usinando ligas de Inconel 718 em altas velocidades. O autor concluiu que micro e macro fraturas foram os dois tipos de modos de falha principais. Caggiano et al. [13] investigou a aplicabilidade de óleos refrigerantes alternativos e a influência do tamanho do grão abrasivo na integridade das superfícies usinadas. Foram utilizados (1) rebolos fabricados em diferentes parâmetros de deposições em banhos galvânicos resultando em variadas concentrações de CBN, e (2) óleos refrigerantes semissintéticos. Cameron et al. [14] investigou o rendimento de retificação em retíficas creep feed após introdução de um sistema de alta pressão utilizando rebolos de óxido de alumínio. O objetivo seria melhorar as condições de usinagem para prevenir os danos térmicos na superfície das peças em fabricação. A relação entre a velocidade de corte do rebolo e a velocidade do fluido na saída do bico refrigerante deve ser 1 para resultados ótimos. A conclusão do estudo sugere que a igualdade entre a velocidade do rebolo e do fluxo de óleo melhora a refrigeração e lubrificação da região de usinagem. Gift et al. [15] investigou o mecanismo primário de falha em rebolos de CBN e o efeito de óleos refrigerantes solúveis em água. Os grãos se desgastam e geram alta temperatura durante a usinagem promovendo a adesão de limalha do material na superfície abrasiva do rebolo e consequente perda de eficiência.

1 Francisco Meira, Engenheiro Mecânico – General Electric - Aviation

2 José Cristiano – D.Sc, Engenheiro Mecânico - Universidade Católica de Petrópolis

3 Renato Portugal – D.Sc, Físico – Universidade Católica de Petrópolis

Bhattacharya et al. [16] examinou três fatores que mais influenciaram a refrigeração – tipo de bico, velocidade de corte e a distância do bico à peça. Para se atingir uma boa eficiência, espera-se um bombeamento do fluido com um fluxo e pressão controlados. A velocidade do fluido refrigerante deve ser igual ou maior que a velocidade periférica do rebolo para que a camada de ar em torno do rebolo em movimento seja deslocada. A cobertura do jato deve abranger todo o perfil a ser retificado. O resultado deste trabalho sugeriu que o ângulo de inclinação do bico não afetou nenhuma das respostas dos testes executados. Qian et al. [17] discutiu em seu trabalho a diferença de duas superligas à base de níquel: fundido K4125 e forjado Inconel 718 retificado com rebolos de corundum marrom. A retificação de superligas à base de níquel sempre gera muita energia que é normalmente transferida para a peça, rebolo e óleo refrigerante. O experimento mostrou que o K4125 foi menos eficiente que o Inconel 718 na dissipação do calor, resultando em uma retificação com maior temperatura. Geralmente, como demonstrado no trabalho, condutividade térmica menor promove o calor na superfície e as temperaturas de retificação, são conseqüentemente, maiores. Gu et al. [18] investigou as forças de corte, a energia específica de retificação e a integridade superficial em superligas utilizando duas especificações de rebolos de óxido de alumínio. Nos dois rebolos, as forças de corte e a temperatura foram reduzidos com o aumento da velocidade de corte. Wegener et al. [19] revisou as tecnologias recentes em máquinas retificadoras e a prontidão das empresas em adotar estes avanços. É abordado no artigo os notáveis desenvolvimentos para melhorar a eficiência através do uso de bicos otimizados, construídos por manufatura aditiva e bombas de óleo refrigerante com demanda orientada. O trabalho sugere o uso de múltiplos bicos com tubos na forma de agulha para criar um jato coerente mais longo e mais estável. Adicionalmente, o uso de simulações utilizando CFD foi utilizado para analisar o fluxo nos bicos e o fluxo de ar em torno do rebolo em movimento. Hacksteiner et al. [20] investigou o consumo de energia relacionado com o rendimento do processo de retificação. Diferentes métodos de verificação podem ser aplicados segundo o autor, incluindo a eliminação da refrigeração na retificação, a redução de corte em vazio e o uso de altas velocidades de corte para reduzir o carregamento do eixo da retífica. A aplicação de retificação de alto rendimento requer um suprimento adequado de refrigeração para garantir a acurácia dimensional, correto alinhamento do bico refrigerante em relação à área de corte e uma secção transversal do bico refrigerante ajustada à zona de contato rebolo-peça.

4. DISCUSSÃO

Como indicado por Rowe [1], a melhoria de um processo de retificação e conseqüente diminuição do risco de falhas do produto usinado pode ser o resultado de mudanças de várias variáveis. Seguindo este conceito, três parâmetros principais foram estudados e melhorados baseados nas literaturas selecionadas: (1) Fabricação dos bicos refrigerantes, (2) Definição da velocidade de corte do rebolo e (3) Perfil de saída do bico refrigerante.

Fabricação dos Bicos Refrigerantes – Os bicos utilizados neste estudo foram modelados e simulados no SolidWorks 2013, Premium e fabricados em impressora 3D através de um processo patenteado chamado FDM (Fused Deposition Modeling). O presente estudo aplicou o mesmo conceito desenvolvido por Rouly [4] onde foi utilizado quatro tipos de material: ABS, ULTEM 1010, ULTEM 9085 e Nylon 12CF. Dois tipos de impressoras 3D foram utilizadas: Fortus 450 and Dimension 1200es.

No primeiro teste foi utilizado o ABS. O seu baixo custo comparado com outras especificações de materiais tornou o ABS ideal para o modelo conceitual, entretanto, durante a fase de testes foi observado trincas prematuras nas laterais do corpo do bico após a usinagem de menos de 500 peças. Esta quantidade é satisfatória para as condições de teste, entretanto inaceitável no ambiente produtivo. O vazamento de óleo refrigerante para áreas diversa à região de corte provoca o dano térmico e conseqüentemente, trincas na peça.

A localização da trinca mencionada é representada na figura 1 foi causada principalmente pela alta pressão interna desenvolvida durante a passagem do óleo refrigerante.

1 Francisco Meira, Engenheiro Mecânico – General Electric - Aviation

2 José Cristiano – D.Sc, Engenheiro Mecânico - Universidade Católica de Petrópolis

3 Renato Portugal – D.Sc, Físico – Universidade Católica de Petrópolis

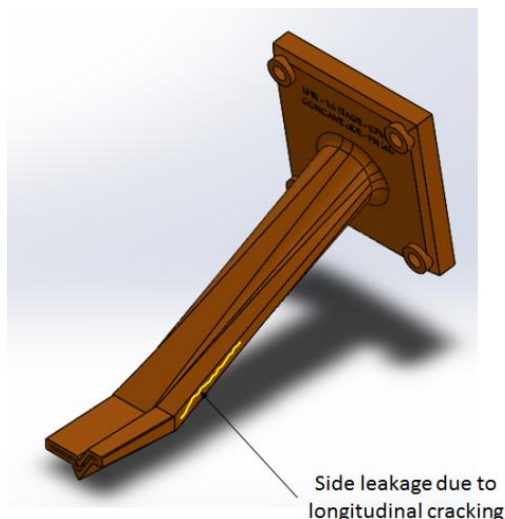


Fig.1 – Trinca típica observada na lateral do corpo do bico.

No segundo teste os protótipos foram fabricados em ULTEM 1010 que é um polietileno amorfo e transparente. O comportamento deste novo material aumentou o tempo até a ocorrência da falha semelhante à figura 1, por trinca e uma média de 2500 peças pôde ser fabricada com o mesmo bico. A figura 2 mostra os protótipos em ABS e ULTEM 1010 montados na máquina para os testes.



Fig. 2 – Setup para testes iniciais com bicos refrigerantes fabricados em ULTEM 1010 (esquerda) and ABS (direita).



Fig. 3 – Bicos refrigerantes impressos em ULTEM 9085.

O terceiro material testado foi o ULTEM 9085 que é um termoplástico de alto rendimento utilizado em prototipagem rápida. É de uso ideal em aplicações que exigem uma alta taxa de resistência à tração e peso de material empregado. Possui baixa toxicidade, produz pouca chama e fumaça. Os bicos refrigerantes produzidos para teste apresentaram comportamento similar ao ULTEM 1010, mas com uma qualidade superficial superior que contribuiu positivamente para o escoamento do fluido gerando menor perda de energia do fluxo.

1 Francisco Meira, Engenheiro Mecânico – General Electric - Aviation

2 José Cristiano – D.Sc, Engenheiro Mecânico - Universidade Católica de Petrópolis

3 Renato Portugal – D.Sc, Físico – Universidade Católica de Petrópolis

Os bicos fabricados em ULTEM 9085 também apresentaram trincas laterais similares ao ABS e ao ULTEM 1010 após produzirem cerca de 2.000 peças em média. A figura 3 mostra os bicos produzidos em ULTEM 9085 prontos para montagem na creep feed.

O quarto e último material selecionado para fabricar os protótipos dos bicos foi o Nylon 12 CF, que é uma fibra de nylon e carbono. O Nylon 12CF é um termoplástico com excelentes características estruturais sendo composto de uma mistura de resina de nylon e 35% do peso de partículas de fibra de carbono. Esta combinação produz um dos mais resistentes termoplásticos do portfólio FDM®. As propriedades mecânicas deste material permitiu a fabricação de bicos refrigerantes com vida suficiente para produzir mais de 5.000 peças (ainda contando) sem apresentar nenhuma falha. O nylon 12CF foi o material considerado adequado para a aplicação industrial em questão. A figura 4 mostra os protótipos produzidos de nylon 12CF e montados na retífica creep feed para os testes iniciais.

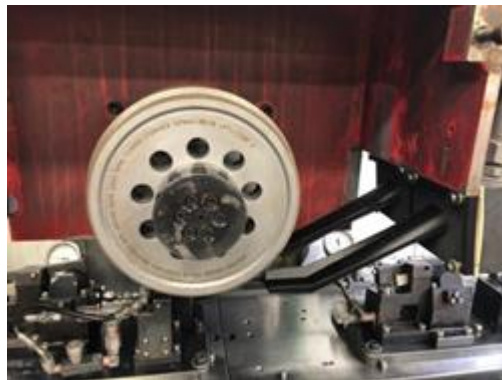


Fig. 4 – Setup para testes dos bicos fabricados em Nylon 12CF.

Definição da Velocidade de Corte do Rebolo – De acordo com fabricantes, os rebolos de CBN podem operar a velocidades de 150m/s ou mais. As literaturas publicadas e selecionadas neste trabalho sugerem uma razão igual a 1 entre a velocidade periférica do rebolo e a velocidade do fluxo de óleo refrigerante.

Adicionalmente, a literatura sugere que o fluxo deve ter uma velocidade mínima de 50m/s para produzir uma limpeza efetiva do rebolo, eliminando os minúsculos cavados removido do material em usinagem e reduzindo o esforço e temperatura durante a retificação.

Baseado nestes conceitos básicos, o programa CNC da retífica Blohm Planomat foi ajustado para 50m/s.

Perfil de Saída do Bico Refrigerante – As dimensões básicas dos bicos foram definidas para permitir o fácil acesso à região de usinagem sem, no entanto, colidir com as partes móveis da máquina e dispositivo de fixação das peças durante a usinagem. A saída do bico foi projetada para produzir um fluxo coerente, ou seja, sem dispersão do fluxo com o aumento da distância, e velocidade maior que 50m/s. Para evitar a aeração do fluido, a dimensão da saída do bico até a área de contato rebolo/peça deverá ser inferior a 100 mm. A figura 5 demonstra a dimensão selecionada como básica de projeto.

Durante o desenvolvimento do perfil interno do bico de refrigeração, fontes potenciais de perda de energia foram consideradas. Foram feitos diversos ajustes para eliminar possíveis recirculações de fluido e pressão de estagnação. A simulação demonstrada na figura 7 indica uma recirculação baixa (velocidade negativa).

A capacidade da máquina em bombear fluido refrigerante para a operação, as propriedades do material utilizado na fabricação do bico e o custo final dos bicos foram os fatores-chaves determinantes na revisão final do projeto. Diversos testes foram feitos na determinação da parede mínima do bico de forma a se obter uma durabilidade mínima de 5.000 peças. A alta velocidade do fluido gera também uma alta pressão interna que pode causar a fratura do bico e interrupções excessivas de produção.

1 Francisco Meira, Engenheiro Mecânico – General Electric - Aviation

2 José Cristiano – D.Sc, Engenheiro Mecânico - Universidade Católica de Petrópolis

3 Renato Portugal – D.Sc, Físico – Universidade Católica de Petrópolis

Desta forma, a espessura da parede é um fator chave na funcionalidade do bico assim como no custo de cada bico fabricado. Experimentalmente determinou-se a espessura de 2.25mm para esta aplicação.

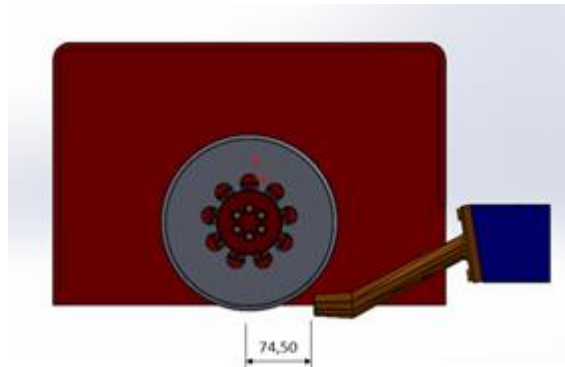


Fig. 5 – Distância entre a saída do bico refrigerante e o centro do rebolo.

O leiaute da operação utiliza dois rebolos de CBN montados simultaneamente no eixo da máquina requerendo desta forma, dois bicos refrigerantes também operando ao mesmo tempo. O máximo fluxo de óleo refrigerante da retífica Blohm Planomat 408 é de 60GPM, conforme mostra a figura 6, sendo o fluxo igualmente dividido entre os dois bicos que possuem a mesma área de saída.



Fig. 6 – Medidor de fluxo da Blohm Planomat 408, em operação (Galões por Minuto).

A simulação CFD foi executada antes da impressão 3D dos bicos, com uma taxa de fluxo de $0.0019\text{m}^3/\text{s}$ para se determinar a máxima área de saída para uma velocidade mínima de 50m/s . A figura 7 mostra um fluxo calculado de 55.098m/s na saída do bico, que atende ao esperado para a operação.

Os resultados obtidos por simulação foram verificados através dos seguintes itens: a) Pressão interna do óleo refrigerante, b) Limpeza do rebolo de CBN, e c) Verificação do rendimento da operação de retificação.

1 Francisco Meira, Engenheiro Mecânico – General Electric - Aviation

2 José Cristiano – D.Sc, Engenheiro Mecânico - Universidade Católica de Petrópolis

3 Renato Portugal – D.Sc, Físico – Universidade Católica de Petrópolis

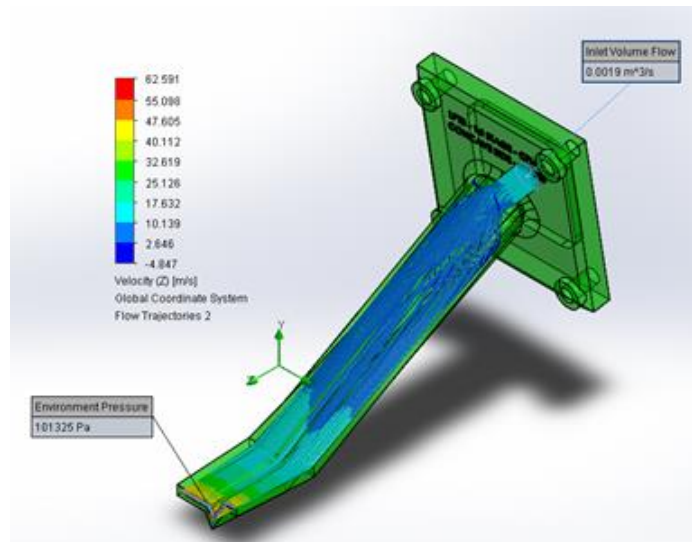


Fig. 7 – Resultados da simulação CFD – Velocidade de saída do fluxo de 55.098m/s.

Pressão Interna do Óleo Refrigerante durante o Fluxo – Com o objetivo de determinar fisicamente a pressão interna causada pelo fluxo de óleo refrigerante, foi instalado um manômetro a 125 mm entrada de fluxo. Uma barra longitudinal foi introduzida para prevenir uma potencial vibração do bico e barras transversais foram instaladas para manter o manômetro rigidamente fixado. A figura 8 mostra o setup do bico na retífica creep feed.



Fig. 8 – Setup na retífica creep feed.

A verificação experimental indicou uma leitura da pressão de 100PSI (689.47kPa) com um fluxo constante, conforme figura 9.



Fig. 9 – Leitura experimental da pressão interna.

1 Francisco Meira, Engenheiro Mecânico – General Electric - Aviation

2 José Cristiano – D.Sc, Engenheiro Mecânico - Universidade Católica de Petrópolis

3 Renato Portugal – D.Sc, Físico – Universidade Católica de Petrópolis

A figura 10 representa a simulação por CFD do fluxo de óleo refrigerante, onde foi obtido na região que o manômetro foi instalado uma pressão com valores mínimo e máximo de 668.84kPa e 749.91kPa, respectivamente. Comparando com o valor físico de 689.47kPa, podemos concluir que a simulação computacional foi confiável.

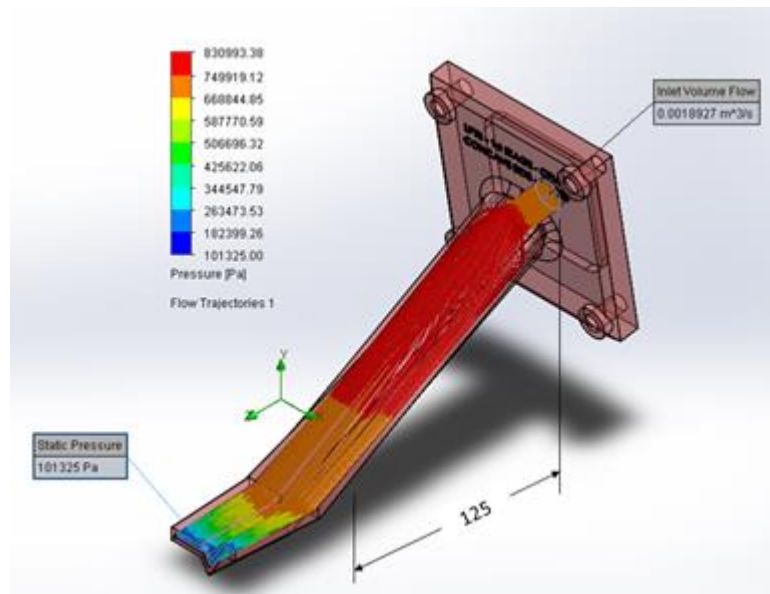


Fig. 10 – Resultado da simulação CFD com pressão interna variando de 668.84 a 749.92kPa no local de instalação do manômetro.

Limpeza do Rebolo de CBN - Resíduos do material usinado aderidos à superfície abrasiva do rebolo contribuem fortemente para a ocorrência do dano térmico e consequentemente para geração de trincas de retífica. Esta aderência impede uma maior capacidade de corte do rebolo, aumentando o esforço requerido pelo eixo da máquina e induz tensões mecânicas na peça. Esta condição pode ser minimizada se a velocidade do fluxo refrigerante exceder 50m/s, conforme Heinzl [8]. Rebolos de CBN utilizados antes da introdução dos novos bicos refrigerantes e removidos por esforço excessivo no eixo da máquina foram visualmente inspecionados com amplificação de 200X. A figura 11 corresponde ao rebolo SN97152 removido em 2015 após produzir 1022 peças. Na foto ampliada é possível identificar depósito de material incrustado entre os grãos de CBN.

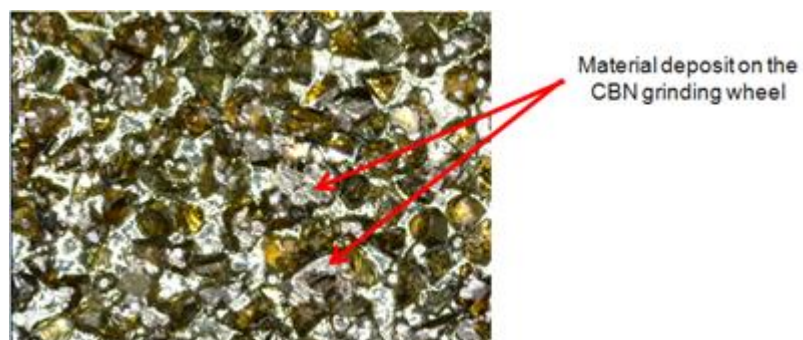


Fig. 11 – Imagem (200X de ampliação) com depósito de material aderido entre os grãos de CBN, na superfície abrasiva.

A figura 12 à esquerda representa a superfície abrasiva do rebolo SN39010 removido em 2018, após a usinagem 2039 peças. Este rebolo particular operou em conjunto com os novos bicos refrigerantes. Para comparação simples, a superfície abrasiva de um rebolo de CBN novo foi

1 Francisco Meira, Engenheiro Mecânico – General Electric - Aviation

2 José Cristiano – D.Sc, Engenheiro Mecânico - Universidade Católica de Petrópolis

3 Renato Portugal – D.Sc, Físico – Universidade Católica de Petrópolis

adicionada ao lado direito da foto. As fotos ampliadas sugerem a melhoria na limpeza do rebolo com um jato de velocidade maior que 50m/s.

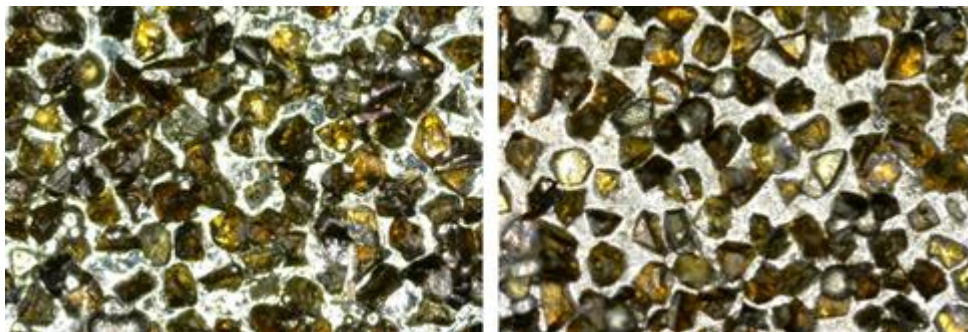


Fig. 12 – Imagem (200X de ampliação) da região abrasiva do rebolo após a introdução dos novos bicos refrigerantes (esquerda) e imagem com mesma ampliação de um rebolo novo (direita).

Verificação do rendimento da operação de retificação: Mais de 3.000 peças foram submetidas à inspeção visual, dimensional e líquidos penetrantes para se determinar o grau de melhoria de processo obtido após a introdução dos novos bicos refrigerantes. Os resultados estão resumidos abaixo:

Inspeção Visual: Todas as peças usinadas foram inspecionadas visualmente quanto à existência de queimaduras ou descoloração anormal. Nenhuma discrepância foi identificada em luz branca e lente de ampliação de 10x, conforme requerido pelas normas técnicas de reparo. Todas as peças foram aprovadas neste quesito.

Inspeção Dimensional: Todas as peças foram inspecionadas e aprovadas dentro dos limites dimensionais de projeto. Variações dimensionais não excederam o campo de tolerância de ± 0.002 inch em todo seu perfil. Todas as peças foram aprovadas neste quesito.

Inspeção por Líquidos Penetrantes: Inspeção LP foi aplicada em 100% das peças usinadas utilizando penetrante de alta sensibilidade conforme método A. Nenhuma indicação de trinca foi identificada nas áreas usinadas. Todas as peças foram aprovadas neste quesito.

5. CONCLUSÃO

A base técnica deste trabalho foi análise de um caso industrial real de reparo de componentes de turbinas aeronáuticas e a revisão de potenciais soluções publicadas por pesquisadores para a prevenção de danos térmicos que geram trincas de retificação. Indicações desta natureza podem progredir até a fratura completa do componente e provocar falhas catastróficas com custos materiais imprevisíveis, danos na imagem das empresas aéreas e principalmente, perdas de vidas humanas.

Diversas melhorias identificadas nos trabalhos publicados foram incorporadas no caso real com o objetivo de aumentar a confiabilidade de processo: (1) Fabricação dos bicos refrigerantes, (2) Definição da velocidade de corte do rebolo e (3) Projeto do perfil de saída do bico refrigerante. A aplicação do conteúdo deste trabalho preenche uma importante vacância na literatura uma vez que não foi identificado nenhum trabalho que compilasse uma seleção de parâmetros orientados para a melhoria de processos de retificação creep feed contribuindo positivamente a qualidade, produtividade e redução de custos operacionais.

Como proposto na seção 2, este estudo visa responder duas questões importantes para a comunidade científica e industrial: (1) Quais são os fatores chave que influenciam no rendimento de um processo de retificação por creep feed e (2) Como a compilação de diversos trabalhos publicados, pode gerar o aumento de produtividade e de confiabilidade em processos de retificação creep feed.

Em resposta para a primeira questão, o estudo demonstrou que múltiplos fatores que afetam o processo de retificação creep feed devem ser tratados como um conjunto de soluções.

1 Francisco Meira, Engenheiro Mecânico – General Electric - Aviation

2 José Cristiano – D.Sc, Engenheiro Mecânico - Universidade Católica de Petrópolis

3 Renato Portugal – D.Sc, Físico – Universidade Católica de Petrópolis

Uma condição ótima de usinagem pode ser obtida quando os parâmetros (especialmente a velocidade de corte) e o fluxo de refrigeração são avaliados em conjunto com a velocidade de saída fluido refrigerante. Verificações experimentais e inspeções dimensionais e não destrutiva validaram os resultados obtidos, o que evidencia que de fato existe uma melhoria na qualidade do processo de usinagem e redução dos riscos de falhas do produto usinado.

A resposta do processo após a incorporação das melhorias foram traduzidos na eliminação de problemas de qualidade (eliminação de trincas), maior vida dos rebolos de CBN (aumento de 33% no número de peças usinadas por reboło) e aumento na velocidade de corte e avanço (15% de redução do tempo de usinagem).

Em resposta à segunda questão, este estudo de caso demonstrou que os vários trabalhos publicados seccionaram os conhecimento técnico sobre creep feed em campos específicos. Esta prática comum muitas vezes impede as indústrias de obterem resultados ótimos em curto espaço de tempo devido à necessidade de se buscar múltiplas publicações e compreender a correlação destes temas. A prática comum da aplicação da experiência governa as ações na maioria das indústrias. A retificação é um processo estratégico [1] e a aplicação das descobertas mais recentes pode ser um aliado importante para vencer os competidores.

A aplicação de conhecimentos selecionados em casos industriais específicos que utiliza rebolos de CBN provou ser benéfico. Pesquisas futuras focadas no desenvolvimento de soluções em retificação com rebolos de óxido de alumínio associado à dressagem contínua (CD – Continuous Dressing) podem ser também muito úteis para as indústrias e a comunidade científica.

6. REFERÊNCIAS

- [1] W. B. ROWE. Towards high productivity in precision grinding. *Inventions* 3(2) (2018) 24. <https://doi.org/10.3390/inventions3020024>
- [2] P. BAXTER and S. JACK. Qualitative case study methodology: study design and implementation for novice researchers. *The Qualitative Report* 13(4) (2008) 544{559. <https://nsuworks.nova.edu/tqr/vol13/iss4/2>
- [3] R. E. STAKE. *The Art of Case Study Research*. Sage, Thousand Oaks, CA, 1995.
- [4] W. B. ROWE. Temperatures in grinding. A review. *J. Manuf. Sci. Eng.* 139(12) (2017) 121001. <https://doi.org/10.1115/1.4036638>
- [5] R. ALBERSI, J. A. SANCHEZ, I. POMBO, B. IZQUIERDO, S. PLAZA, D. BARRENETXEA. Strategies for optimal use of fluids in grinding. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 51 (2011) 491{499.
- [6] E. ROULY, R. J. BAUER, A. WARKENTIN. An investigation into the effect of nozzle shape and jet pressure in profile creepfeed grinding. *Journal of Engineering Manufacture* 231(7) (2017) 1116-1130. <https://doi.org/10.1177/0954405415584960>
- [7] A. LOPEZ-ARRAIZA, G. CASTILLO, H. N. DHAKAL, R. ALBERDI. High performance Composite Nozzle for improvement of Cooling in grinding machine tools. *Composites: Part B* 54 (2013) 313{318.
- [8] SUJIT MAJUMDAR, SURAJ KUMAR, DEBASISH ROY, SAMIK CHAKROBORTY, SANTANU Das. Improvement of lubrication and cooling in grinding, *Materials and Manufacturing Processes* 33(13) (2018) 1459-1465. <https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1364756>

1 Francisco Meira, Engenheiro Mecânico – General Electric - Aviation

2 José Cristiano – D.Sc, Engenheiro Mecânico - Universidade Católica de Petrópolis

3 Renato Portugal – D.Sc, Físico – Universidade Católica de Petrópolis

- [9] S. EBBRELL, N. H. WOOLEY, Y. D. TRIDIMAS, D. R. ALLANSON, W. B. ROWE. The effects of cutting fluid application methods on the grinding process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40 (1999) 209-223.
- [10] C. HEINZEL, G. ANTSUPOV. Prevention of wheel clogging in creepfeed grinding by efficient tool cleaning. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61 (2012) 323-326.
- [11] G. VIDAL, N. ORTEGA, H. BRAVO, M. DUBAR, H. GONZÁLEZ. An analysis of electroplated cBN grinding wheel wear and conditioning during creepfeed grinding of aeronautical alloys. *Metals* 2018, 8, 350; doi:10.3390/met8050350.
- [12] J. WANG, T. YU, W. DING, Y. FU, A. F. BASTAWROS. Wear evolution and stress distribution of single CBN superabrasive grain in high-speed grinding. *Precision Engineering* (2018), <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.05.003>.
- [13] A. CAGGIANO, R. TETI. CBN grinding performance improvement in aircraft engine components manufacture. *SciVerse ScienceDirect, CIRP* 9 (2013) 109-114.
- [14] A. CAMERON, R. BAUER, A. WARKENTIN. An investigation of the effects of wheel-cleaning parameters in creepfeed grinding. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 50 (2010) 126-130.
- [15] F. C. GIFT JR, W. Z. MISIOLEK. Fluid performance study for groove grinding a nickel-based superalloy using electroplated cubic boron nitride (CBN) wheels. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 126 (2004) 451-458.
- [16] A. BHATTACHARYA, A. BATISH, M. SINGH. Experimental studies to validate simulated results for nozzle effectiveness using multi-response optimization during cylindrical grinding process. *International Journal of Materials Engineering Innovation*, Vol. 3, Nos. 3 / 4, 2012.
- [17] N. QIAN, W. DING, Y. ZHU. Comparative investigation on grindability of K4125 and Inconel718 nickel-based superalloys. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1993-y> (2018).
- [18] Y. GU, H. LI, B. DU, W. DING. Towards the understanding of creep-feed deep grinding of DD6 nickel-based single-crystal superalloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2686-2> (2018).
- [19] K. WEGENER, F. BLEICHER, P. KRAJNIK, H. HOFFMEISTER, C. BRECHER. Recent developments in grinding machining. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.006> (2017)
- [20] M. HACKSTEINER, H. PEHERSTORFER, F. BLEICHER. Energy efficiency of state-of-the-art grinding processes. *Procedia Manufacturing* 21 (2017) 717–724.

1 Francisco Meira, Engenheiro Mecânico – General Electric - Aviation

2 José Cristiano – D.Sc, Engenheiro Mecânico - Universidade Católica de Petrópolis

3 Renato Portugal – D.Sc, Físico – Universidade Católica de Petrópolis