

## **REQUISITOS DE QUALIDADE NA FABRICAÇÃO DE UM MANCAL AEROSTÁTICO PARA SIMULADOR DE CONTROLE DE ATITUDE**

*Janaina Fracaro de Souza*<sup>1</sup>, *Sérgio Frascino Müller de Almeida*<sup>1</sup>, *Jacson Machado Nunes*<sup>1</sup>, *Ricardo Sutério*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil, janainaf@ita.br

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, suterio@lit.inpe.br

**Resumo:** Este trabalho define os requisitos de qualidade no que tange a rugosidade e desvio de forma, necessários para fabricação de um mancal aerostático. O mancal é parte do protótipo de um simulador de atitude sendo formado por um estator fabricado em alumínio e uma esfera, em acrílico. Como a usinabilidade do acrílico é pouco conhecida, houve a necessidade de realizar estudos preliminares para a conclusão de sua fabricação, demonstrados neste trabalho através de análise do processo de torneamento e fresamento para a sua qualificação.

**Palavras chave:** Acabamento superficial, simulador de controle de atitude, erro de forma, usinagem de acrílico.

### **1. INTRODUÇÃO**

Este trabalho apresenta parte o desenvolvimento do processo de manufatura e qualificação superficial de um protótipo de um simulador de controle de atitude com mancal aerostático em três graus de liberdade que tem como finalidade servir de plataforma para avaliar o desempenho de sistemas de controle de atitude para aplicações em satélite [1], tendo como função simular as grandes mudanças de atitude e minimizar o efeito de torques de perturbação.

Simuladores de controle de atitude de mancal aerostático em três graus de liberdade são ferramentas básicas e necessárias para a integração e testes de satélites. O simulador ora em desenvolvimento faz parte de um projeto denominado ITASAT, que é um satélite de aplicação científica em desenvolvimento pelo ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica em parceria com o INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

As características operacionais do mancal aerostático dependem exclusivamente da sua qualidade de fabricação, e devem possuir os mais baixos erros de forma e dimensão possíveis. Para atingir esse limite de qualidade buscam-se operações sucessivas de acabamento nos componentes do mancal, bem como o uso de métodos especiais tal como lapidação.

Como não existe certeza quanto à influência de erros de forma e qualidade superficial nos componentes de mancais lubrificados a filme fluido, busca-se sempre alcançar a condição ideal, ou seja, uma fabricação das peças o mais próximo possível do perfil teórico. Como as folgas exigidas entre as partes nos mancais aerostáticos são muito pequenas,

menores ainda deverão ser os erros de fabricação obtidos pelos processos, tanto em forma quanto em rugosidade.

O mancal é parte do protótipo do simulador de atitude e é formado por um estator e uma esfera (conjunto de duas hemisferas coladas) fabricados em alumínio e acrílico, respectivamente (Fig.1). Ao injetar ar pressurizado no estator do mancal aerostático (estator + esfera), a esfera passa a movimentar-se sobre o filme de ar formado na superfície de modo a simular um satélite em órbita. Um computador de controle, baseado nas medições dos giroscópios e em um algoritmo de controle, calcula os torques a serem aplicados pelas rodas de reação para controlar a atitude da esfera. O protótipo possui formato esférico devido a necessidade de se permitir movimentos de rotação em três eixos.



**Fig. 1. Mancal aerostático formado pela esfera de acrílico e estator**

Um aspecto importante no projeto de mancais aerostáticos é o limite tecnológico encontrado para a fabricação dos mesmos, embora sendo em alumínio e com características de usinagem bem conhecidas, deve-se ter um compromisso entre os erros de forma e à folga existente entre o mancal e a esfera. A qualidade superficial e geométrica da esfera de acrílico influencia no desempenho do simulador de atitude [2] e, embora a fabricação de esferas seja um processo simples, não há informações suficientes disponíveis na literatura, sobre a usinabilidade em acrílico.

Mancais aerostáticos utilizam um filme fino de gás a alta pressão para suportarem carregamentos. Como o ar tem viscosidade muito baixa se comparada com o gás, as folgas necessárias entre as superfícies dos mancais e esfera, devem ser muito pequenas em torno de 5 a 25  $\mu\text{m}$  [3], [4].

## 2. OBJETIVO

Segundo Pereira (1998), o grande desafio da fabricação é obter nos componentes as tolerâncias especificadas, pois elas influenciam diretamente no desempenho do simulador de atitude.

A fabricação do simulador de atitude no projeto foi dividida em 05 fases distintas:

- 1) Usinagem das duas hemisferas acrílicas;
- 2) Usinagem dos sistemas de fixação dos componentes internos da esfera;
- 3) Modelagem e usinagem do estator do mancal aerostático;
- 4) Lapidação da esfera; e
- 5) Posicionamento dos restritores e ajustes de forma e de qualidade superficial do mancal.

Este artigo analisa a influência dos processos de fabricação, fresamento e torneamento, na qualidade superficial e geométrica de uma hemisferas de acrílico, tarefa crítica devido às restrições funcionais inerentes ao projeto simulador de controle de atitude com mancal aerostático em três graus de liberdade, e analisar a primeira fase do projeto nas seguintes atividades:

- Avaliação do fresamento espiral da esfera de acrílico;
- Avaliação do fresamento radial da esfera de acrílico;
- Avaliação do torneamento da esfera de acrílico;

## 3. USINAGEM DE ACRÍLICO

O acrílico é um material que possui baixa condutividade térmica e que o calor gerado durante o processo de usinagem é praticamente todo absorvido pela ferramenta de corte e a outra parte é removida pela refrigeração com fluido de corte. Esse fato que acelera o desgaste das ferramentas de corte e, junto com uso de altas velocidades e altos avanços, provoca avaria na superfície usinada.

Se os cavacos de acrílico retornam para a zona de corte, ocorre o aumento do desgaste da ferramenta e uma piora do acabamento superficial, pois o cavaco começa a se soldar na face da peça e no gume da ferramenta formando o chamado gume postiço (Fig. 2).

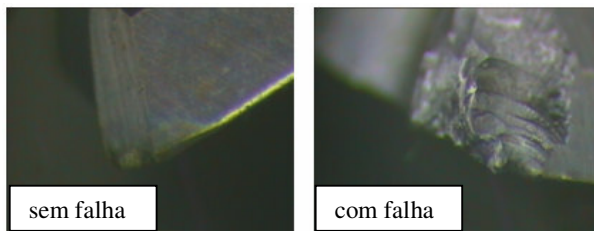


Fig. 2. Fresa com gume postiço após usinagem do acrílico

O processo de torneamento, quando comparado ao fresamento, é um processo onde não há corte interrompido, ou seja, a ferramenta de corte não fica entrando e saindo da peça continuamente, o que resulta em um melhor acabamento superficial da peça [5].

### 3.1 Método

Em ambas as etapas de manufatura foram realizadas as medições de: qualidade superficial, qualidade dimensional e tempo de usinagem. No fresamento foram testados dois tipos de estratégias: a trajetória da ferramenta espiral e radial com os mesmos parâmetros de corte. Em cada caso os parâmetros de corte foram fixados conforme descrito na tabela 01:

Tabela 1. Parâmetros de corte da usinagem em acrílico

	Fresamento	Torneamento
<b>Ferramenta</b>	Topo reto (desbaste) Topo esférico (acabamento)	Pastilha de metal duro
<b>Diâmetro</b>	12 mm	0,8
<b>Número de facas</b>	2	--
<b>Rampa</b>	Espiral com 10°	--
<b>Direção de corte</b>	Concordante	Concordante
<b>Avanço radial</b>	0,40.D	0,40.D
<b>Rugosidade teórica</b>	0,5 µm	0,5 µm
<b>Velocidade de corte</b>	450 m/min	150 m/min
<b>Avanço por dente</b>	0,08 mm	0,06 mm
<b>Rotação</b>	12.000 rpm	250 rpm

A ferramenta utilizada no fresamento de acabamento das hemisferas foi uma fresa de topo esférico.

As ferramentas utilizadas no torneamento de acabamento das hemisferas e do estator foram pastilhas para alumínio de 0,4 mm de raio, fabricante ISCAR e com especificações VCGT 160404 AS IC20.

A preparação da matéria-prima que será usada na fabricação da geometria esférica impõe importantes restrições visto que não há disponível no mercado blocos de acrílico com as dimensões desejadas. Desse modo, a peça bruta da esfera é formada por chapas acrílicas formando um único bloco.

### 3.2 Materiais

Para usinagem das peças foi utilizado um centro de usinagem Hermle C 600U, processo de fresamento a altas velocidades de corte (HSM – High Speed Machining); e um torno Index CNC GU 1000.

O sistema CAD/CAM no qual as peças foram modeladas e as usinagens programadas foram através do Unigraphics NX4 da empresa Siemens.

## 4. AVALIAÇÃO METROLÓGICA

Esta etapa consistiu na medição do mancal e das esferas com os objetivos básicos de:

- Obter informações sobre os erros de forma e das superfícies do mancal e das esferas acrílicas fabricadas;
- Qualificar as operações de fabricação, por meio das rugosidades superficiais medidas.

Para quantificar a qualidade dimensional das peças usinadas utilizou-se uma máquina de medição por coordenadas (MMC), modelo Crysta-Apex C7106, fabricada pela Mitutoyo, erro máximo de  $(1,7 + 3L/1000)$  µm,

equivalendo a uma exatidão de aproximadamente 3  $\mu\text{m}$  para todas as medições realizadas. A Fig. 03 apresenta a configuração de medição utilizada.

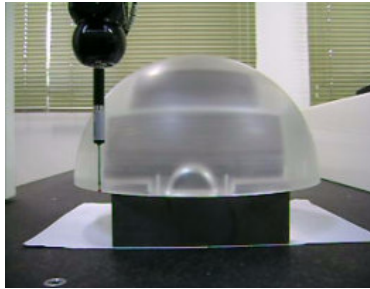


Fig. 3. Configuração de medição de forma geométrica na máquina de medir por coordenadas.

Neste trabalho a rugosidade superficial foi obtida por três técnicas, valores de Ra (rugosidade média), Ry (rugosidade máxima) e Rt (rugosidade total) foram obtidos através de uma máquina de medir rugosidade de superfícies complexas, CNC Form Measuring Instrument Series (Fig.4), também do fabricante Mitutoyo.



Fig. 4. Configuração de medição de rugosidade na máquina de medir rugosidade de superfícies complexas

Para medição da rugosidade das três hemisferas acrílicas, elas foram medidas em 4 regiões diferentes: a 0°, 90°, 180° e 270° de forma a verificar a variação dos valores de rugosidade nas diferentes regiões usinadas das hemisferas.

## 5. RESULTADOS

Os resultados obtidos nos três processos de usinagem, fresamento com trajetória em espiral, fresamento com trajetória radial e torneamento são apresentados a seguir.

A tabela 03 apresenta os resultados obtidos na usinagem de acrílico das hemisferas usinadas. Foi observado visivelmente que as superfícies das três peças apresentaram diferenças significativas no acabamento superficial. A hemisfera fresada com a estratégia de corte em espiral apresentou degraus maiores, já a hemisfera que utilizou a estratégia radial apresentou uma superfície menos rugosa em comparação a anterior. Porém como esperado, a rugosidade média da hemisfera torneada apresentou melhor qualidade superficial, porém o fresamento radial apresentou rugosidade  $R_y$  e  $R_z$  com qualidade superior ao torneamento, indicando uma menor profundidade de vales na superfície da peça.

Tabela 3. Rugosidade das hemisferas usinadas.

Rugosidade	Fresamento Espiral ( $\mu\text{m}$ )	Fresamento Radial ( $\mu\text{m}$ )	Torneamento ( $\mu\text{m}$ )
Ra	1,80	0,50	0,40
Ry	8,89	1,49	3,10
Rz	8,89	1,49	3,20

A figura 05 apresenta os resultados das rugosidades medidas em função do processo de usinagem realizado.

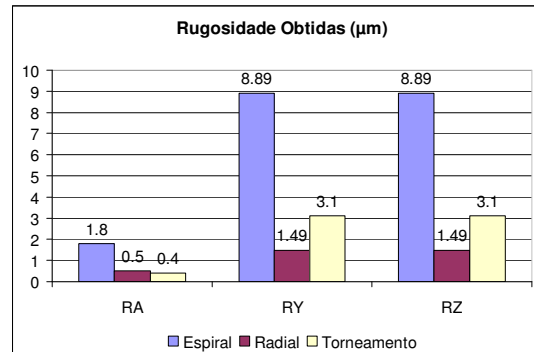


Fig. 5. Detalhe do acabamento do superficial do estator.

Na usinagem das hemisferas acrílicas, foi adotada uma rugosidade teórica de 0,5  $\mu\text{m}$  com base em outros projetos de mancais aerostáticos já desenvolvidos, como o mancal aerostático projetado por Pereira (1998). Neste projeto, tanto o fresamento radial quanto o torneamento atenderam as especificações pré-definidas.

A tabela 04 apresenta as medidas geométricas das hemisferas de acrílico, diâmetro médio, o desvio-padrão experimental e o valor de circularidade. A tabela 05 apresenta as medidas geométricas do estator de alumínio, diâmetro médio, o desvio-padrão experimental e o valor de circularidade.

Tabela 4. Medição geométrica das hemisferas usinadas.

	Fresamento Espiral	Fresamento Radial	Torneamento
Diâmetro Médio:	349,84 mm	349,86 mm	349,96 mm
Desvio-padrão:	0,10 mm	0,10 mm	0,01 mm
Circularidade:	0,15 mm	0,14 mm	0,04 mm

O diâmetro da esfera, apesar de ter sido dimensionado para um diâmetro nominal de 350 mm, todas apresentaram valor medido menor, mas todas dentro da tolerância de projeto GD&T ( $\pm 0,50$  mm). Observa-se que o processo de torneamento esteve mais próximo do valor nominal além de apresentar menor desvio-padrão experimental e menor valor de circularidade.

Tabela 5. Medição do estator.

	Torneamento
Diâmetro Médio:	351,64 mm
Desvio-padrão:	0,26 mm
Circularidade:	0,08 mm

Neste caso específico a avaliação geométrica foi apenas investigativa, pois o mesmo sofrerá um segundo processo de manufatura, ou seja: aplicação de resina epoxi e lapidação com objetivo de ajustá-la à forma da esfera acrílica na cela do estator. Para facilitar a aderência da resina, o acabamento exigido para esta superfície é grosseira, como observado na Fig. 6.

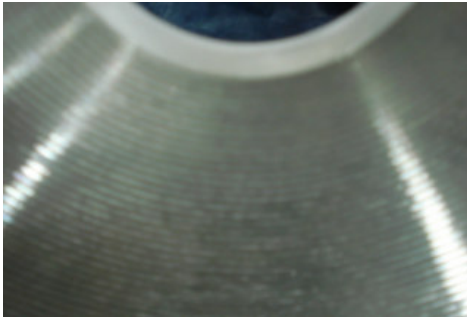


Fig. 6. Detalhe do acabamento do superficial do estator.

Os tempos de usinagem das hemisferas acrílicas foram verificados e analisados neste trabalho e estão apresentados na tabela 6.

Tabela 6. Tempo de usinagem das hemisferas acrílicas.

	Fresamento Espiral	Fresamento Radial	Torneamento
Tempo de usinagem	4 horas	6 horas	2 horas

Pode-se observar que o processo de torneamento foi o processo que traz maior vantagem com relação ao tempo de usinagem.

Uma das maiores dificuldades no processo de fabricação foi obter a folga necessária do mancal para coincidir o eixo de rotação da esfera acrílica ao eixo geométrico do estator. Pois em caso de não possibilidade, correr-se-ia o risco da esfera acrílica orbitar em torno do eixo geométrico do estator causando um desbalanceamento residual no sistema, prejudicando o funcionamento do simulador.

Outro fator de grande importância foi obter uma condição de rugosidade na usinagem do acrílico, que garantisse o processo de lapidação sem que houvesse alteração na forma das hemisferas. Os resultados obtidos demonstraram que tais dificuldades foram eliminadas devido a especificação de projeto e aos processos de fabricação utilizados.

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou o desenvolvimento do processo de manufatura e qualificação superficial de um protótipo de um simulador de controle de atitude com mancal aerostático em três graus de liberdade.

O trabalho apresentou o processo de usinagem de três hemisferas de acrílico utilizando dois processos de fresamento e um processo de torneamento.

O processo de torneamento foi o processo que trouxe a maior vantagem em relação aos demais. Além de atender as

especificações de projeto, foi o processo que foi realizado em 25 % do tempo do processo de fresamento radial.

Porém a utilização da tecnologia HSM possibilitou constatar que o fresamento radial também atendeu plenamente os requisitos de acabamento superficial e tolerância geométrica de esferas em acrílico, chegando a resultados similares ao processo de torneamento com vantagens aparentemente significativas nos parâmetros de rugosidades  $R_y$  e  $R_z$ , em torno de 50 % melhor que o processo de torneamento.

Esta aparente vantagem para mancais aerostáticos pode ser um fator que possa influenciar positivamente no funcionamento do mancal aerostático, devido que, os valores de  $R_y$  e  $R_z$  informam sobre a distribuição média da superfície, indicando menores números de vales na rugosidade superficial. É de se esperar que o processo de lapidação seja mais facilitado do que simplesmente o parâmetro  $R_a$ , porém este fator na prática ainda não foi observado. Estas vantagens deverão ser assunto para trabalhos futuros.

O fresamento espiral apresentou os piores resultados na usinagem do acrílico, sendo um processo descartado neste projeto.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior, pelo suporte financeiro ao estudo, a MITUTOYO São Paulo por realizar as medidas de rugosidade e ao CTMSP/ARAMAR - Centro de Tecnológico da Marinha em São Paulo pelo suporte técnico e ceder o torno para usinagem das peças.

## REFERÊNCIAS

- [1] J.F. Souza, “Anteprojeto de um simulador de controle de atitude com mancal aerostático em três graus de liberdade”, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, pp. 136-156, 2007.
- [2] M. Pereira, “Desenvolvimento de uma mesa de retificação para a usinagem de sapatas planas circulares para mancais aerostáticos”, Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.
- [3] R.P. Oliveira, “Projeto, fabricação e qualificação de um mancal aerostático duplo-esférico”, Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.
- [4] M.M. Berry, “Integrated orbit and attitude control for a nanosatellite with power constraints. AAS/AIAA Space Flight Mech. Conf, P. Rico, 2003.
- [5] J.O. Gomes, “Fabricação de superfícies de forma livre por fresamento no aço temperado ABNT 420, na liga de alumínio AMP8000 e na liga de cobre Cu-Be”, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- [6] A.A. Albertazzi, A.Souza, “Fundamentos de metrologia científica e industrial”, São Paulo: Manole, 2008.