

DEFINIÇÃO DOS PROCESSOS E PARÂMETROS PARA USINAGEM DE ESFERA ACRÍLICA APLICADA NUM SIMULADOR DE CONTROLE DE ATITUDE

Janaina Fracaro de Souza, janainaf@ita.br¹

Jacson Machado Nunes, jacson@ita.br²

Sérgio Frascino Müller de Almeida, frascino@ita.br³

Jefferson de Oliveira Gomes, gomes@ita.br⁴

^{1,2,3,4}Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 Vila das Acácias, CEP: 12 228-900

Resumo: Este artigo objetiva identificar os parâmetros de corte e o processo de fabricação mais adequado para a usinagem de uma esfera de acrílico que atenda os requisitos funcionais de qualidade especificados no projeto do protótipo de um simulador de controle de atitude em três graus de liberdade sustentado em mancal aerostático. 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: acrílico, parâmetros de corte, acabamento superficial, simulador de controle de atitude.

1. INTRODUÇÃO

O simulador de atitude é ferramenta básica e necessária para integração e testes de satélites. O modelo concebido neste trabalho é formado por uma esfera de acrílico de 350 mm de diâmetro cujos componentes: rodas de reação, dispositivo de balanceamento fino, dispositivos de fixação, placas de comando computacional, giroscópios e bateria de alimentação, são todos montados em seu interior (esfera acrílica). 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.

É fato que a qualidade superficial e a geométrica da esfera influenciam no desempenho do simulador de atitude e, embora a fabricação de esferas seja comum, quando se trata do material acrílico, não há informação disponível na literatura. Dessa forma, este trabalho também define parâmetros e estratégias de corte adequadas para a usinagem deste tipo de material.

Com isso, torna-se fundamental identificar, além do processo, os parâmetros de corte capazes de usinar a superfície esférica em acrílico garantindo qualidade superficial adequada para que o simulador de controle de atitude flutue sobre a base do mancal aerostático.

Os processos de usinagem comparados foram o fresamento e torneamento, ambos CNC. Para cada superfície usinada foi calculada a rugosidade média no sentido transversal a direção do avanço de corte. Os resultados permitem concluir que o desempenho do torneamento de acrílico no que tange a qualidade superficial prevalece sobre o outro processo de usinagem analisado neste trabalho (Souza, 2007).

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 lubrificadas 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 (Figura.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.

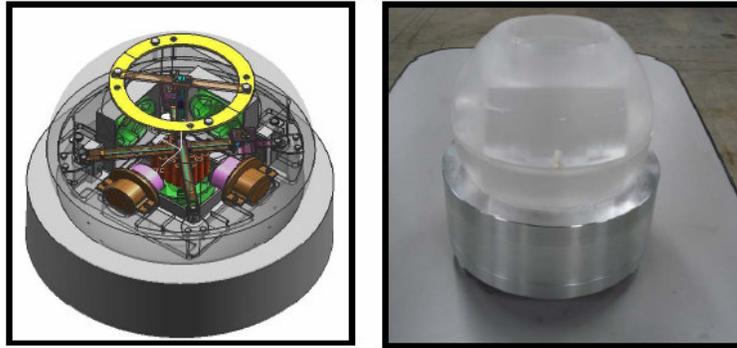


Figura. 1. Mancal aerostático formado pela esfera de acrílico e estator

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 (Pereira, 1998) e, embora a fabricação de esferas seja um processo simples, não há informações suficientes disponíveis na literatura, sobre a usinabilidade em acrílico.

2. OBJETIVOS

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 objetiva analisar 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. Esta análise subdividiu-se em:

- Identificar os parâmetros de corte mais adequados para usinagem do material acrílico;
- Avaliar o fresamento espiral da esfera de acrílico;
- Avaliar o fresamento radial da esfera de acrílico;
- Avaliar o torneamento da esfera de acrílico;

3. USINAGEM DO ACRÍLICO

O acrílico é um material que possui baixa condutividade térmica e, por isso, 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. Este primeiro fato 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 (Figura 2). Além disso, deve-se considerar que o acrílico dilata e contrai mais do que a maioria dos materiais requerendo uma fixação com espaço para absorver a dilatação.

Por estes motivos foi necessário identificar os parâmetros de corte mais adequados para usinagem em acrílico. Em testes preliminares de usinagem com tarugos de acrílico percebeu-se que em altas velocidades de corte e altos valores de avanço por dente o acabamento superficial resultante do processo de usinagem não era satisfatório devido às altas temperaturas geradas pelo atrito material e ferramenta. Quando inverte a condição, ou seja, utiliza baixas velocidades de corte e baixos valores de avanço também se percebeu que o acabamento superficial ainda não é satisfatório, neste caso a ferramenta fica mais tempo em contato com peça. Dessa forma optou-se em utilizar velocidades de corte e valores de avanço intermediários até que se atingiu valores ideais para um bom acabamento superficial em peças acrílicas.

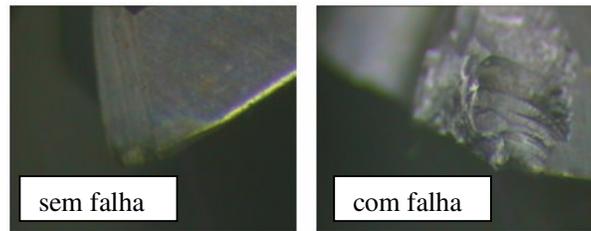


Figura. 2. Fresa com gume postiço após usinagem do acrílico.

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 (Gomes, 2008).

No processo de fresamento foram utilizadas duas trajetórias distintas (trajetória espiral e a trajetória radial) para identificar a melhor forma de fresamento de uma esfera acrílica em uma fresadora CNC.

A estratégia de corte espiral permite definir os pontos de movimentação espiral para fora de um ponto central especificado. Os pontos de movimentação são criados dentro do plano normal ao vetor e ao centro da projeção do ponto central. Esses pontos são projetados então sobre as superfícies selecionadas da peça ao contrario de outros métodos de movimentação que requerem uma mudança abrupta no sentido devido à passagem de corte seguinte, o método de movimentação espiral é uma transição direta e constante, por isso mantém uma velocidade constante do corte e um movimento suave, portanto adequada para máquinas de alta velocidade. Essa usinagem iniciou na borda da cavidade, eliminando saídas desnecessárias da ferramenta (Figura 3).

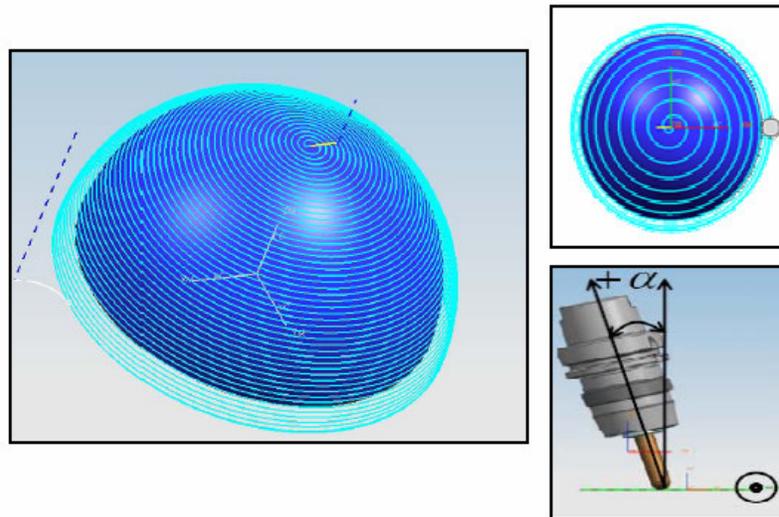


Figura 3: Trajetória Espiral

A estratégia de corte espiral (Figura 3) permite definir os pontos de movimentação espiral para fora de um ponto central especificado. Os pontos de movimentação são criados dentro do plano normal ao vetor e ao centro da projeção do ponto central. Esses pontos são projetados então sobre as superfícies selecionadas da peça. Ao contrário de outros métodos de movimentação que requerem uma mudança abrupta no sentido devido à passagem do corte seguinte, o método de movimentação espiral é uma transição direta e constante para fora, por isso mantém uma velocidade constante do corte e um movimento suave, portanto útil para aplicações à máquina de alta velocidade.

Já a estratégia de corte radial permite gerar os trajetos de movimentação perpendiculares a uma linha e ao longo de um limite dado, usando uma distância, uma largura de faixa e um corte especificado. Na estratégia radial a velocidade de corte se comporta de maneira diferente ao ilustrado na Figura 3 devido a inclinação de β da ferramenta em relação ao plano de corte. Essa inclinação dá no sentido de corte e conseqüentemente o a_c mantém-se igual nos dois lados em relação ao centro da ferramenta, fazendo com que as cristas mantenham iguais e por isso aumentando a qualidade do acabamento superficial (Figura 4).

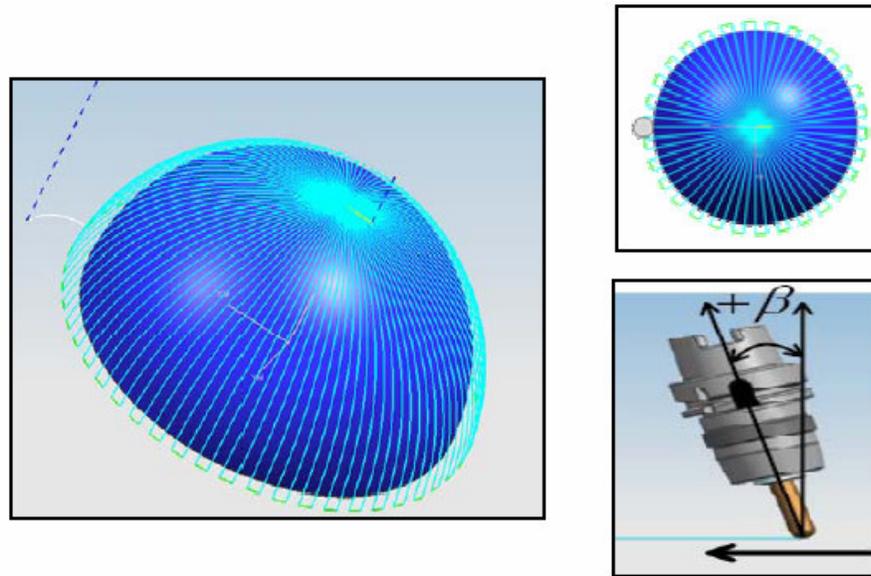


Figura. 4. Trajetória Radial.

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

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 coladas formando um único bloco.

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

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

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.

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.

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

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.

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 μm para todas as medições realizadas.

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

4. 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 (μm)	Fresamento Radial (μm)	Torneamento (μm)
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.

Na usinagem das hemisferas acrílicas, foi adotada uma rugosidade teórica de 0,5 μm 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.

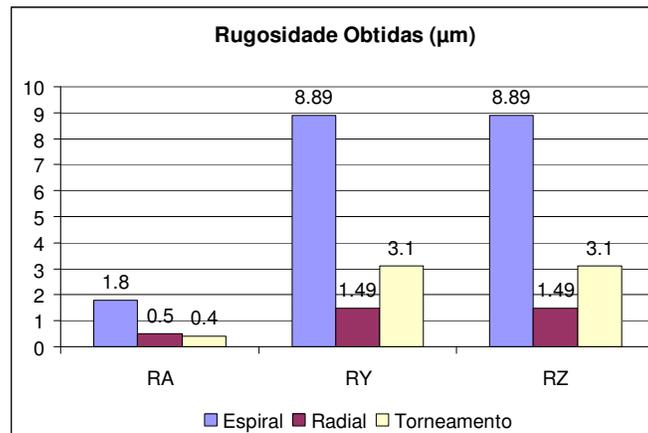


Figura 5. Detalhe do acabamento do superficial do estator.

A tabela 4 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 Figura 6.

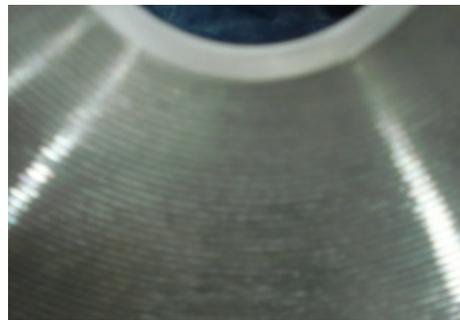


Figura 6. Detalhe do acabamento do superficial do estator.

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

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

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 à especificação de projeto e aos processos de fabricação utilizados.

5. 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 o fresamento e o 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.

Portanto observou-se que na usinagem de acrílico os parâmetros de corte influenciam diretamente na qualidade superficial da peça acabada, dessa forma é importante utilizar refrigeração direcionada na região de corte, isso porque o acrílico é um material que não absorve calor, ou seja, todo calor gerado vai para ferramenta, reduzindo então sua vida útil.

6. 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.

7. REFERÊNCIAS

- Souza, J.F., 2007, “Anteprojeto de um simulador de controle de atitude com mancal aerostático em três graus de liberdade”, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, pp. 136-156.
- Pereira, M., 1998, “Desenvolvimento de uma mesa de retificação para a usinagem de sapatas planas circulares para mancais aerostáticos”, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Oliveira, R.P., 1994, “Projeto, fabricação e qualificação de um mancal aerostático duplo-esférico”, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Berry, M.M., 2003, “Integrated orbit and attitude control for a nanosatellite with power constraints”, AAS/AIAA Space Flight Mech. Conf, P. Rico.
- Gomes, J.O., 2008, “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.
- Albertazzi, A.A. Souza, A. “Fundamentos de metrologia científica e industrial”, São Paulo: Manole.
- Carvalho, W.V., 2007, “ Definições de estratégias de corte para fabricação de protótipo de satélite em acrílico”, CREEM, 2007.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

DEFINITION OF MANUFACTURING PROCESS AND CUTTING PARAMETERS FOR ACRYLIC SPHERE APPLIED TO AN ATTITUDE CONTROL SIMULATOR

Janaina Fracaro de Souza, janainaf@ita.br¹

Jacson Machado Nunes, jacson@ita.br²

Sérgio Frascino Müller de Almeida, frascino@ita.br³

Jefferson de Oliveira Gomes, gomes@ita.br⁴

^{1,2,3,4} Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 Vila das Acácias, CEP: 12 228-900

Abstract. *This article aims to identify the parameters of cutting and manufacturing process more suitable for the machining of a sphere of acrylic that meets the functional requirements of quality specified in the design of the prototype of an attitude control simulator in three degrees of freedom sustained in air bearing. As the machinability of acrylic is little known, there was the need to carry out preliminary studies for the completion of its manufacture, demonstrated in this work by examining the process of turning and milling for their qualification.*

Keywords: *Acrylic, parameters for cutting, finishing superficial, simulator control of attitude*