



CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

CONCEPÇÃO DE MODELO EM PROTOTIPAGEM 3D PARA INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE CHOQUE HIPERSÔNICO

Thiago Victor Cordeiro Marcos, thiagovcm@ieav.cta.br¹
Renan Guilherme Santos Vilela, rgsvilela@gmail.com²
João Felipe de Araújo Martos, joaomartos@gmail.com²
Victor Alves Barros Galvão, victor.galvao@ieav.cta.br²
David Romanelli Pinto, romanelli@ska.com.br³
Marco Antônio Sala Minucci, sala@ieav.cta.br⁴
Paulo Gilberto de Paula Toro, toro@ieav.cta.br⁴
Israel da Silveira Rego, israel.rego@ieav.cta.br⁴
Antônio Carlos de Oliveira, acoc@ieav.cta.br⁴

¹Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais (FUNCATE), Avenida João Guilhermino, nº 429, Centro, CEP 12.210-131, São José dos Campos/SP-Brasil.

²Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Praça Marechal Eduardo Gomes, nº 50, Vila das Acácias, CEP 12228-900, São José dos Campos/SP-Brasil.

³SKA – Automação, Praça Chuí, 35 – Vila Ema – São José dos Campos – SP.

⁴Instituto de Estudos Avançados (IEAv), Trevo Coronel Aviador José Alberto Albano do Amarante, nº 1, Putim, CEP 12.228-001, São José dos Campos/SP-Brasil.

Resumo: Atualmente, o uso da prototipagem rápida 3D, também conhecida como impressão 3D, tem sido investigado por universidades, no exterior, como uma técnica inovadora, rápida, flexível e econômica para a fabricação direta de modelos plásticos mais leves e com geometrias complexas para serem testados em túneis de vento de alta-velocidade (Túneis de Choque Hipersônicos). A finalidade, inicialmente, é integrar peças prototipadas em plásticos a modelos metálicos, fabricados via usinagem convencional. Futuramente, pretende-se que os modelos convencionais possam ser substituídos por modelos prototipados inteiramente. Atualmente, os projetos mecânicos de modelos metálicos a serem ensaiados em Túneis de Choque Hipersônicos são baseados nos processos de fabricação convencionais, portanto, limitados as formas e geometrias convencionais. O uso da prototipagem rápida 3D abre um leque de opções que possibilita a inovação nas geometrias e formas a serem utilizadas para a fabricação de novos modelos. Com o objetivo de explorar ao máximo a criatividade e flexibilidade que são permitidas pelo processo de prototipagem 3D, a concepção e o projeto de um modelo prototipado, para túnel de choque hipersônico, deve ser repensado e adaptado quando comparamos o mesmo modelo fabricado através de usinagem convencional. O objetivo deste trabalho é comparar a concepção e projeto de um modelo fabricado através de prototipagem 3D com o de usinagem convencional, mostrando as vantagens e as desvantagens de cada processo e os benefícios que a prototipagem 3D pode trazer para a fabricação de modelos a serem ensaiados em túneis de choque hipersônicos.

Palavras-chave: Prototipagem 3D, Túneis de Choque Hipersônicos, Investigação Experimental, Impressão 3D.

1. INTRODUÇÃO

A Divisão de Aerodinâmica e Hipersônica (EAH) do Instituto de Estudos Avançados (IEAv) realiza atividades de pesquisa e desenvolvimento aplicadas a veículos hipersônicos através das três (3) subdivisões: Subdivisão de Simulação Computacional (EAH-C), que tem como atribuição realizar pesquisa e desenvolvimento de modelagem de sistemas aeroespaciais e de métodos computacionais para estudos da aerodinâmica de sistemas hipersônicos; Subdivisão de Técnicas de Diagnóstico (EAH-D), que realiza pesquisa e desenvolvimento de técnicas de diagnóstico para medição de parâmetros de interesse em escoamentos hipersônicos, para dar apoio aos projetos desenvolvidos na área de escoamentos hipervelozes; e Subdivisão de Hipersônica Experimental (EAH-E), que tem por finalidade executar as atividades de simulação em laboratório do voo de veículos aeroespaciais, e o desenvolvimento de pesquisa na área hipersônica experimental visando o conhecimento da Ciência e Engenharia, envolvendo: Adquirir conhecimento dos

fenômenos físicos/químicos envolvendo escoamento em hipervelocidade; Realizar Pesquisa e Desenvolvimento em sistemas propulsivos a ar aspirado para futuros veículos aeroespaciais hipervelozes; e Apoiar o Programa Espacial Brasileiro.

A Subdivisão de Hipersônica Experimental possui três Túneis de Choque Hipersônicos “Fig. 1” e aplica, basicamente, a metodologia de análise teórico-analítica para projetos de modelos, para ser ensaiados em Túneis de Choque Hipersônicos.



Figura 1. Laboratório de Aerodinâmica e Hipersônica Prof. Henry T. Nagamatsu.

Túneis de Choque Hipersônicos “Fig. 2” são dispositivos laboratoriais que reproduzem em solo as condições de pressão, temperatura, densidade e velocidades encontradas por veículos aeroespaciais quando estes voam, na atmosfera terrestre, em velocidades acima da velocidade do som, acima de Mach 1.



Figura 2. Túneis de Choque Hipersônicos T2 e T3.

Atualmente os modelos ensaiados nos Túneis de Choque são fabricados de metal através de processos de usinagem convencionais “Fig. 3”, o que gera altos custos de fabricação devido a suas geometrias complexas e exclusivas, além de longos prazos para fabricação, que podem chegar a 90 dias, dependendo da complexidade dos processos.

Recentemente, a prototipagem rápida 3D tem sido usada como uma técnica inovadora, rápida e econômica de fabricação “direta” de modelos plásticos mais leves e com geometria complexa para serem testados em túneis vento de alta-velocidade pulsados e tem sido investigada por algumas universidades pelo mundo “Fig. 4” a fim de substituir o uso de modelos metálicos fabricados via usinagem convencional.

Na indústria aeronáutica, o uso de materiais plásticos prototipados por impressora 3D, vem sendo cada vez mais comuns. A AIRBUS, uma das maiores fabricantes de aeronaves do mundo, já possui peças prototipadas homologadas e em uso. A EMBRAER já está homologando peças fabricadas por uma impressora 3D.



Figura 3. Modelos fabricados em metal e ensaiados no Túnel de Choque Hipersônico T3.



Figura 4. Veículos prototipados testados em túnel de vento “Fonte: Mark Drela, 2011”

Diante desta nova metodologia, o Laboratório de Aerotermodinâmica e Hipersônica Prof. Henry T. Nagamatsu em parceria com a empresa STRATASYS, representada pela SKA no Brasil, realizou investigação experimental de uma rampa de compressão prototipada, semelhante a uma rampa construída em metal através de usinagem convencional, fabricada pelo sistema de prototipagem rápida 3D Fortus 900Mc da STRATASYS, através da tecnologia FDM – Fused Deposition Modeling “Fig. 5”.

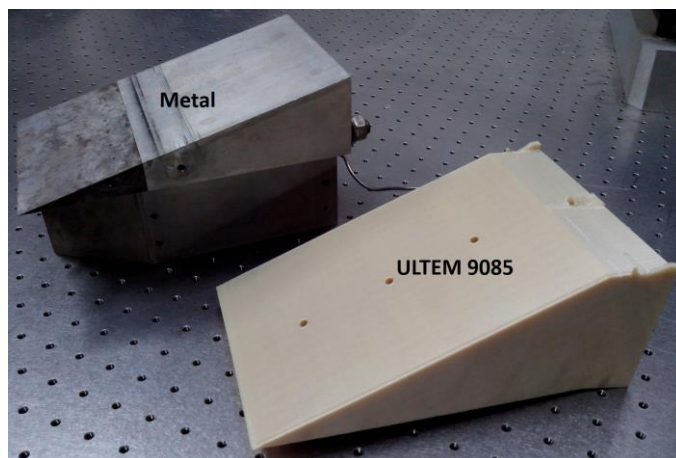


Figura 5. Rampas de compressão testadas no Túnel de Choque T2: Metal e Plástica (ULTEM 9085).

Tais estudos foram realizados com sucesso no túnel de vento hipersônico pulsado T2, fortalecendo a justificativa para aquisição da Impressora 3D Fortus 900 “Fig. 6” o que possibilitará a continuidade das pesquisas da fabricação de modelos prototipados em plástico para uso em Túneis de Choques Hipersônicos no Laboratório de Aerotermodinâmica e Hipersônica Prof. Henry T. Nagamatsu.



Figura 6. Sistema de Prototipagem Rápida FDM, “STRATASYS FORTUS 900”.

Ao decorrer deste trabalho serão apresentadas as diferenças nas concepções entre modelos prototipados e em modelos metálicos usinados, além de vantagens e desvantagens de cada processo.

1.1 – Tecnologia FDM

A prototipagem rápida tem por característica a construção de geometrias complexas e livres das limitações impostas pela usinagem convencional, o que fez surgir o termo “*Solid Freeform Fabrication*” que significa Fabricação de Sólidos de Forma Livre.

Atualmente, existem várias tecnologias de construção de protótipos através de adição de material por camadas. Uma das tecnologias mais utilizadas é a FDM “*Fused Deposition Modeling*” que pode ser traduzido como Deposição de Material Fundido.

Inicialmente, prende-se, por meio de vácuo, uma folha de construção “*Build Sheet*” sobre uma superfície plana de metal no interior do forno. Sobre a folha de construção será construída, por deposição de material camada por camada, um suporte para o modelo prototipado.

Este suporte tem como objetivo separar a folha de construção do modelo a ser prototipado, minimizando a troca de calor entre metal da superfície plana de metal no interior do forno e o modelo de plástico. Posteriormente, este suporte após a prototipagem do modelo será descartado. O suporte, ainda, tem como objetivo a sustentação de superfícies que ficassem sobre espaços vazios e é depositado um material, diferente do modelo, que não adere ao material do modelo, possibilitando a sua retirada após o processo. O suporte pode ser retirado através de uma solução solvente ou arrancado mecanicamente com alicates e ferramentas manuais.

A tecnologia FDM “*Fused Deposition Modeling*”, empregada na FORTUS 900 “Fig. 6”, consiste em depositar (sobre o suporte) material camada por camada através de bicos extrusores aquecidos, em temperatura que pode chegar na ordem de 400 °C. O ambiente onde é feita a deposição é um forno que mantém todas as peças em temperaturas controladas e ventilação adequada para que as camadas de material sejam resfriadas uniformemente “Fig. 7”.

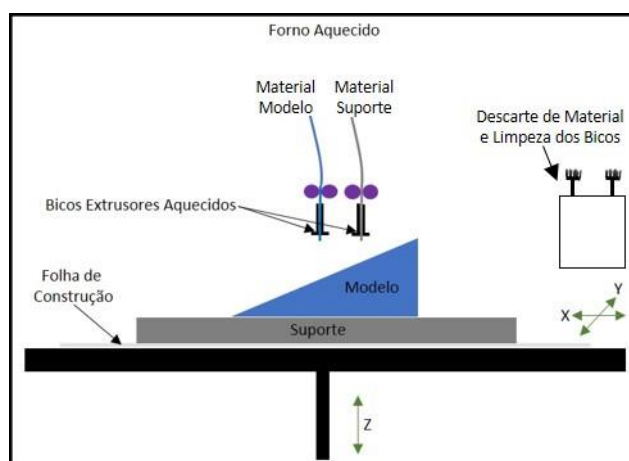


Figura 7. Representação do processo de prototipagem rápida – FDM

1.2 – Túnel de Choque Hipersônico

Conforme “Romanelli Pinto (2011), o túnel é constituído por um tubo de choque onde um bocal convergente-divergente é acoplado ao final da seção de baixa pressão (do tubo de choque). Com isto o gás aquecido e comprimido pela onda de choque incidente (no tubo de choque) é expandido (no bocal convergente-divergente) para altas velocidades (correspondentes a números de Mach de 6 a 25) e altas temperaturas (correspondentes a entalpias da ordem de 10 MJ/kg), produzindo escoamento hipersônico na seção de teste do túnel, semelhantes àquelas encontradas durante o voo de um veículo aeroespacial entrando na atmosfera terrestre em velocidades hipersônicas. O tempo de teste, estimado na seção de teste, de 2 a 10 milésimos de segundo são suficientes para o estudo dos fenômenos que ocorrem em sistemas de propulsão hipersônica aspirada baseada na tecnologia da combustão supersônica”.

O Túnel de Choque Hipersônico T3 “Fig. 8” tem seção de teste de 0,60 m. de diâmetro e 1,40-m de comprimento, inaugurado em Dezembro de 2006, com financiamento da “FAPESP”.



Figura 8. Túnel de Choque Hipersônico T3.

2. CONCEPÇÃO DO MODELO

A concepção do modelo de Rampa “Fig. 9”, ensaiado no Túnel de Choque T2, construída de aço inox através de usinagem convencional foi baseada na configuração de uma rampa de entrada de um motor *scramjet* com 15° de inclinação. A rampa tem furos por onde o gás combustível é injetado.

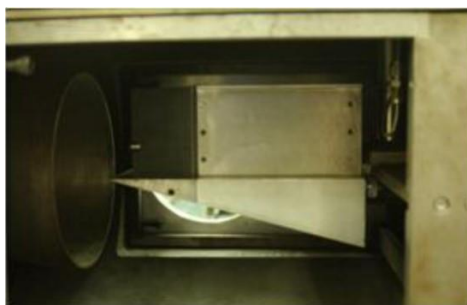


Figura 9. Rampa de 15° testada no Túnel de Choque Hipersônico T2.

Baseado na concepção da rampa metálica foi proposto a construção de uma rampa prototipada para comparar os resultados, principalmente quanto a sua resistência mecânica e a interação da onda de choque com o acabamento superficial produzido pela tecnologia FDM.

Nesta nova concepção houve uma alteração do projeto original, afim de possibilitar a injeção de combustível através do escoamento hipersônico, como podemos ver no desenho abaixo “Fig. 10”.



Figura 10. Foto da rampa prototipada e desenho em CAD.

A prototipagem rápida possibilitou a concepção de um injetor que não seria possível ser fabricado através de usinagem convencional. O injetor tem geometria interna complexa com cavidades interligadas para possibilitar a passagem do gás, furos com diâmetros e ângulos diferentes “Fig. 11”.

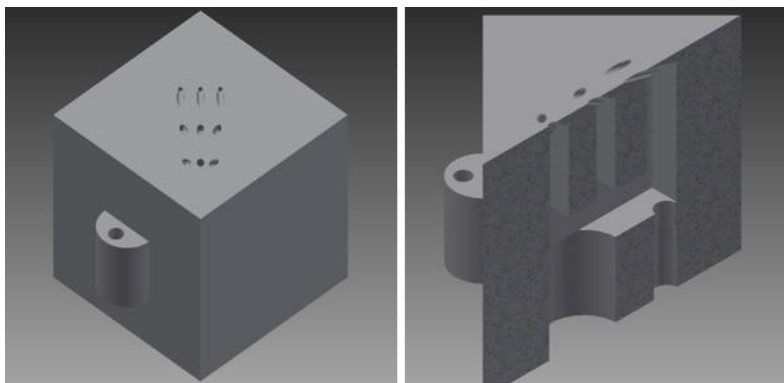


Figura 11 – Injetor de combustível prototipado.

A mudança na concepção de um projeto para prototipagem rápida se dá pelo fato de podermos construir de forma livre, sem a preocupação com o processo de construção, já que a prototipagem é extremamente versátil e maleável, em relação a um processo de usinagem convencional.

Existe um compromisso entre alguns fatores que devem ser considerados, entre eles, aspecto da superfície, tolerância geométrica, resistência mecânica e tempo de construção:

a) O aspecto da superfície está diretamente ligado ao sentido com que a peça é prototipada “Fig. 7”, pois a forma de construção por camadas pode fazer com que os filamentos sejam sobrepostos de forma não linear, produzindo um aspecto de escada, o que prejudica o aspecto da peça. O ideal, no caso de rampas, é que o filamento fique no sentido longitudinal da rampa. Na figura abaixo “Fig. 12” pode-se observar uma extrapolação do que acontece na prototipagem de uma rampa. No caso A os filamentos são prototipados no sentido transversal da rampa e no caso B os filamentos são prototipados no sentido longitudinal.

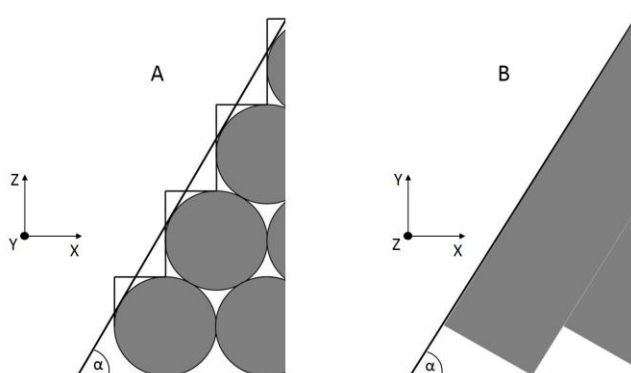


Figura 12. Aspecto da superfície prototipagem.

b) A tolerância geométrica também depende do sentido de prototipagem “Fig. 7”. No caso de furos circulares, por exemplo, se forem feitos paralelos ao sentido de crescimento das camadas não ficarão com a geometria circular perfeita “Fig. 13”, devido o sentido de deposição dos filamentos. Nesse caso o furo deve ser perpendicular ao sentido de crescimento da camada “Fig. 14”, de forma que a circularidade dependerá da precisão dos eixos X e Y.

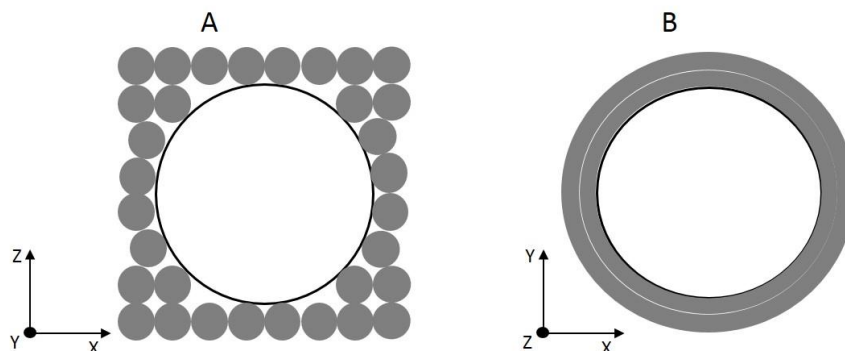


Figura 13 – Tolerância Geométrica.

c) Resistência mecânica da peça ou modelo, assim como para outros fatores, está ligada diretamente ao sentido de prototipagem, ao tipo de material utilizado e o tipo de preenchimento que pode ser sólido ou espaçado. Se o esforço estiver no sentido longitudinal do filete será aplicado contra uma deformação elástica, caso A. Enquanto se o esforço estiver no sentido transversal do filamento a resistência será aplicada sobre a fusão entre um filete e outro aplicando um esforço plástico, caso B, conforme podemos ver na “Fig. 14”.

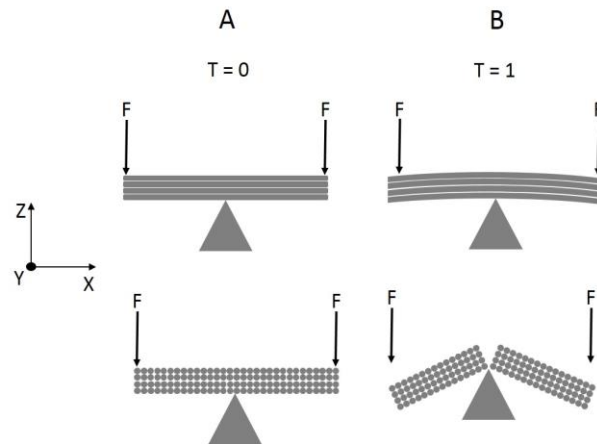


Figura 14. Resistência mecânica em relação ao sentido de prototipagem.

d) O tempo de prototipagem é um fator que pode ter muitas variáveis, neste trabalho abordam-se as mais relevantes para o uso corriqueiro. Entre essas variáveis estão o sentido de prototipagem, tipo de preenchimento e quantidade de camadas de suporte.

O sentido de prototipagem influencia no tempo por causa do número de camadas, quando maior o número de camadas maior o tempo de prototipagem.

O tipo de preenchimento pode ser sólido ou espaçado. No processo de prototipagem a cabeça de impressão percorre camada por camada da geometria do modelo para depositar material, no caso de um preenchimento sólido a área percorrida é maior, portanto o tempo aumenta em relação a um preenchimento espaçado, por isso o tempo pode variar. A dimensão do espaçamento pode variar dependendo da necessidade e resistência mecânica solicitada no modelo. Na “Fig. 15” podemos ver 3 regiões: região A preenchimento sólido; região B pouco espaçado; região C muito espaçado.

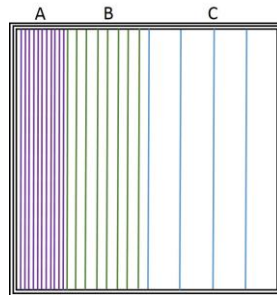


Figura 15. Tipos de preenchimento.

O material de suporte “Fig. 16”, quando há a necessidade de usá-lo, é o fator que influencia no tempo de prototipagem, pois em uma mesma camada a cabeça de impressão deve ir ao ponto de descarte de material “Fig. 7” para limpar os bicos extrusores e voltar até a peça para continuar a prototipagem. Esse tempo de troca de material suporte para material modelo é um processo lento, em relação a velocidade com que a cabeça de impressão se movimenta.

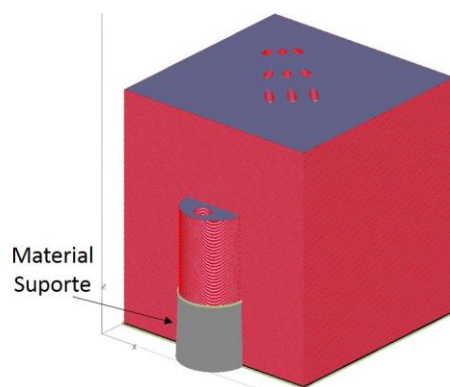


Figura 16. Exemplo de material de suporte.

3. COMENTÁRIOS E CONCLUSÃO

O Instituto de Estudos Avançados (IEAv) tem como preceito estar na vanguarda do conhecimento buscando sempre a inovação, por isso o Laboratório de Aerodinâmica e Hipersônica Prof. Henry T. Nagamatsu teve a iniciativa de testar um modelo prototipado no Túnel de Choque Hipersônico T2 e posteriormente adquirir um centro de prototipagem rápida 3D *FORTUS 900* para prototipagem de modelos de testes e acessórios para os túneis de choque, lasers e óptica.

Como em qualquer processo de fabricação existem vantagens e desvantagens na prototipagem rápida 3D em relação a usinagem convencional. Entre as principais vantagens estão: criatividade, livre de limitações geométricas impostas pelos processos convencionais; tempo de confecção e rapidez com que a peça ou modelo são construídos; inovação das geometrias e formas; redução dos custos de produção para peças de uso exclusivo e geometrias complexas (que não serão produzidas em série); não há desperdício de material, pois não há remoção de cavacos. As desvantagens, da prototipagem rápida em relação a usinagem convencional, estão relacionadas principalmente a resistência mecânica e durabilidade, que em alguns casos podem ser superadas por adaptações e novas concepções.

A usinagem convencional é vantajosa na criação de perfis conhecidos e acessíveis, como tubos, barras, chapas, blocos e etc.

Naturalmente a prototipagem rápida não tem a intenção de substituir a usinagem, mas de trabalhar junto, no sentido de facilitar e baratear custos de produção e cada vez mais buscar romper as barreiras da inovação.

As novas possibilidades, com o uso da prototipagem rápida, trazem consigo o compromisso de inovar e explorar ao máximo a criatividade abandonando alguns preceitos e costumes provenientes dos projetos e concepções de modelos a serem usinados através de processos convencionais.

Sendo assim, está-se a buscar a inovação e a vanguarda da tecnologia na construção de modelos e veículos hipersônicos para serem testados em túneis de choque hipersônicos.

4. AGRADECIMENTOS

O último autor gostaria de agradecer a FINEP por possibilitar a aquisição do Centro de Prototipagem 3D *FORTUS 900* através do Projeto “Combustão Supersônica Assistida a Laser”, convênio nº 01.11.0365.01.

5. REFERÊNCIAS

- Romanelli Pinto, D., Marcos, T. V. C., Galvão, V. A. B., Oliveira, A. C., Chanes Jr, J. B., Minucci, M. A. S. and Toro, P. G. P., 2011, “Flow Characterization of the T3 Hypersonic Shock Tunnel”, 28th International Symposium on Shock Waves, 2011, Manchester, Inglaterra.
- Drela, M., 2011, “Development of the D8 Transport Configuration”, 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2011, Honolulu, Hawaii, pp 2011-3970.
- Selhorst Jr., A., Canciglieri Junior, O. e Iarozindki Neto, A., 2007, “Análise Comparativa entre os Processos de Prototipagem Rápida por Deposição ou Remoção de Material na Concepção de Novos Produtos”, 4º Congresso Brasileiro de Engenharia da Fabricação, 2007, Estância de São Pedro, Porto Alegre, RS.

6. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo material publicado neste trabalho.

3D PROTOTYPING MODEL DESIGN FOR EXPERIMENTAL INVESTIGATION IN HYPERSONIC SHOCK TUNNEL

Thiago Victor Cordeiro Marcos, thiagovcm@ieav.cta.br¹
Renan Guilherme Santos Vilela, rgsvilela@gmail.com²
João Felipe de Araújo Martos, joaomartos@gmail.com²
Victor Alves Barros Galvão, victor.galvao@ieav.cta.br²
David Romanelli Pinto, romanelli@ska.com.br³
Marco Antônio Sala Minucci, sala@ieav.cta.br⁴
Paulo Gilberto de Paula Toro, toro@ieav.cta.br⁴
Israel da Silveira Rego, israel.rego@ieav.cta.br⁴
Antônio Carlos de Oliveira, acoc@ieav.cta.br⁴

¹Fundação de Ciências, Aplicações e Tecnologias Espaciais - FUNCATE, Av. Dr. João Guilhermino, 429 – 11º andar – Centro – São José dos Campos – SP,

²Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 – Vl. das Acácias – São José dos Campos – SP,

³SKA – Automação, Praça Chuí, 35 – Vila Ema – São José dos Campos – SP,

⁴Instituto de Estudos Avançados - IEAv, Trevo Cel. Av. José A. A. do Amarante, 01 – Putim – S. J. Campos – SP.

Abstract: *Currently, the use of 3D rapid prototyping, also known as 3D printing, has been investigated by some universities around the world as an innovative technique, fast, flexible and cheap for a direct plastic models manufacturing that are lighter and with complex geometries to be tested for hypersonic shock tunnel. Initially, the purpose is integrated prototyped parts with metal models that actually are manufactured through of the conventional machining and hereafter replace them with completely prototyped models. The mechanical design models to be tested in hypersonic shock tunnel are based on conventional manufacturing processes, therefore are limited forms and standard geometries. The use of 3D rapid prototyping offers a range of options that enables geometries innovation and ways to be used for the design new models. The conception and project of a prototyped model for hypersonic shock tunnel should be rethought and adapted when comparing the conventional manufacturing processes, in order to fully exploit the creativity and flexibility that are allowed by the 3D prototyping process. The objective of this paper is to compare the conception and project of a 3D rapid prototyping model and a conventional machining model, while show the advantages and disadvantages of each process and the benefits that 3D prototyping can bring to the manufacture of models to be tested in hypersonic shock tunnel.*

Keywords: *3D Prototyping, hypersonic shock tunnel, experimental research, 3D printing.*