

# Análise Multicritério para seleção de Componentes Aeronáuticos candidatos ao processo de Manufatura Aditiva em Titânio

Samuel Bloch da Silva<sup>1</sup>, Anderson Ribeiro Correia<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

**Resumo** – O processo de decisão normalmente envolve informações imprecisas e/ou incompletas, múltiplos critérios de escolha e vários agentes de decisão. Além disso, os problemas de decisão envolvem também múltiplos objetivos que, geralmente são conflitantes entre si. Neste sentido a tomada de decisão pela transição de um processo convencional de usinagem para um aditivo, deve representar o melhor resultado técnico para o componente frente a diferentes critérios de análise. De forma geral, uma das maiores dificuldades está justamente no estabelecimento deste critérios para julgamento, sendo desta forma o foco do presente artigo.

**Palavras-Chave** – Análise multicritério, Manufatura Aditiva, Componente Aeronáutico.

## I. INTRODUÇÃO

A expressão <Análise Multicritério> é utilizada como termo geral para descrever um conjunto de regras formais orientadas a ajudar pessoas e/ou grupos a tomarem decisões lógicas baseadas em múltiplos critérios [1]. Este tipo de abordagem é útil considerando os conflitos normais oriundos de qualquer processo decisório, principalmente quando o mesmo envolve questões subjetivas. Considerando que o tema é extenso, o presente artigo tem por objetivo estabelecer um modelo de análise de decisão útil ao processo de identificação de componentes aeronáuticos usinados em titânio candidatos a serem manufaturados de forma aditiva. A opção pelo titânio está relacionada com a importância deste material para o setor aeronáutico mundial. Apesar da participação do titânio ser inferior ao do alumínio na fabricação de um avião, a indústria aeronáutica consome cerca de 75% da produção mundial deste material; sendo a liga Ti-6Al-4V a mais utilizada independente do processo [2]. No que se refere ao processo, a usinabilidade do Ti-6Al-4V é dificultada por sua alta reatividade química com o material da ferramenta e sua baixa condutividade térmica gerando uma alta temperatura entre cavaco, ferramenta e a peça [3]. Neste contexto, a manufatura aditiva em titânio poderá ser uma opção caso o componente em análise seja suscetível ao processo alternativo.

## II. IDENTIFICAÇÃO DO CONTEXTO DECISÓRIO

### A. Definição da Problemática de Referência

Para [4] a problemática da escolha é considerada a mais clássica das problemáticas, na medida que a pesquisa operacional tradicional quase sempre encarou a tomada de decisão meramente como a escolha da solução ótima. Esta problemática é usada quando, por exemplo, queremos

escolher um computador dentre vários para comprar, pois neste caso, o computador a ser escolhido será o mais adequado segundo os critérios técnicos de juízos estabelecidos pelos decisores. Em relação aos atores/decisores, cada um tem o seu próprio sistema de valores que defende e que o representa dentro da formulação de uma problemática de escolha qualquer. No artigo em questão, buscou-se minimizar este aspecto utilizando-se de componentes fictícios, doravante chamados de *dummies*, para ajudar na elaboração de uma clara problemática de escolha. Isto difere da forma proposta por [4], uma vez que não é possível envolver neste momento todos os atores e decisores na construção desta questão.

### B. Determinação dos Pontos de Vista Fundamentais

Os pontos de vistas fundamentais (PVF) explicam os valores que os decisores consideram importantes naquele contexto e que, ao mesmo tempo, definem as características das ações que são de interesse destes atores [5]. Como adotou-se uma abordagem diferente em relação aos atores/decisores, foi desenvolvida uma tabela estabelecendo os Pontos de Vistas Fundamentais mais importantes com base em referências bibliográficas:

TABELA I - SUMARIZADO BIBLIOGRÁFICO DOS PONTOS DE VISTAS FUNDAMENTAIS (PVF)

Autor	Característica da tecnologia	PVF adotado
[4]	Customização em massa Redução do valor de estoque Modificações rápidas em componentes Redução desperdício	Custo Componente
[5]	flexibilidade para se produzir peças a partir do projeto em 3D	Complexidade Componente
[6]	Avaliação de protótipos em escala 1:1 ou reduzida Avaliação de aspectos visuais e acabamento	Tamanho Componente
[7]	Rápido desenvolvimento de protótipos operacionais	Tamanho e Complexidade do Componente
[8]	Redução de custos na Cadeia Produtiva Customização em massa	Custo e Complexidade Componente

A Tabela I sumariza algumas bibliografias recentes sobre as características da manufatura aditiva, de maneira a contribuir na estruturação de uma árvore de decisão pautada inicialmente nos *dummies*, para posterior aplicação em um

componente piloto. Como sugestão para trabalhos futuros, a pesquisa bibliográfica deverá ser expandida para identificação de novos PVF relacionados à tecnologia.

### III. ESTRUTURAÇÃO DA ÁRVORE DE DECISÃO

Para construção adequada de um método de análise multicritério baseado em árvore de decisão para o tópico em questão, os pontos de vistas fundamentais (PVF) apresentados na Tabela I foram convertidos em 3 ramos principais (Fig.1):

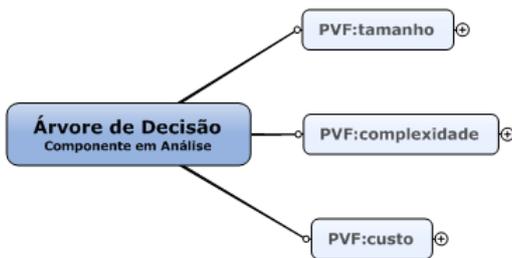


Fig. 1. Árvore Decisão com os 3 PVF para Análise de um Componente qualquer.

Considerando que apenas os PVF não são suficientes para uma análise completa, os mesmos foram expandidos para critérios técnicos na forma de ramos, os quais ajudam a refinar a compreensão e melhorar o entendimento dos envolvidos sobre a problemática de referência [5]. No presente artigo, os critérios estabelecidos são genéricos e definidos a partir de *dummies* com tamanhos padronizados, complexidades gerais de usinagem e custos unitários (Fig.2).

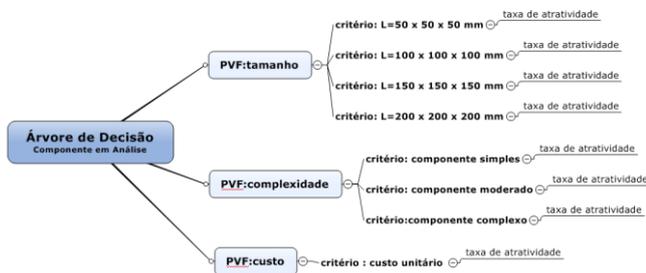


Fig. 2. Pontos de Vista Fundamentais e seus respectivos Critérios genéricos de análise.

Cada critério genérico apresentado na árvore (Fig.2) precisa estar associado a uma taxa de atratividade ou função de valor que faça sentido a um futuro grupo decisor quando um determinado componente usinado for avaliado pelo método. O tópico a seguir detalha este aspecto dentro da análise multicritério proposta.

#### A. Definição da Função de Valor para os PVF

Conforme abordado anteriormente, para cada ponto de vista fundamental foram determinados critérios genéricos de maneira que seja possível mensurar a atratividade entre os diferentes PVF através de uma função de valor. O julgamento desta função de valor foi estabelecida através do método

semântico [11], associando a um peso relativo a sua importância:

TABELA II - PESOS PARA O JULGAMENTO SEMÂNTICO DO PVF

Julgamento Semântico	Peso (weight) (w)
Multíssimo importante	5
Muito importante	4
Importante (médio)	3
Relativamente importante	2
Pouco importante	1

Ou seja, este primeiro nível de julgamento da árvore (Fig.1) se pauta nas percepções dos decisores envolvidos e seus paradigmas em relação ao tema (peso atribuído). Especificamente para o artigo em questão, o julgamento semântico de cada PVF foi arbitrado para facilitar o desenvolvimento do estudo de caso.

#### B. Taxa de Atratividade para os Critérios ligados aos PVF

Para efeito de ponderação dos critérios, é possível se avaliar a taxa de atratividade sob duas óticas [5][11]:

- *rating* para julgamento semântico direto
- interpolação polinomial

No artigo optou-se pela ponderação mista dos critérios via interpolação polinomial e *rating*, o que demandará mais informações sobre o componente em análise. No que tange ao julgamento semântico nesta etapa, a Tabela III apresenta a escala de *rating* utilizada:

TABELA III - PESOS PARA O RATING DO JULGAMENTO SEMÂNTICO DOS CRITÉRIOS

Julgamento Semântico	Rating (r) convencional	Rating (r) usado no artigo
Extremamente alto	9	9
Muito alto	8	interpolação
Alto	7	interpolação
Levemente alto	6	interpolação
Importante (médio)	5	interpolação
Levemente baixo	4	interpolação
Baixo	3	interpolação
Muito baixo	2	interpolação
Extremamente baixo	1	1

Conforme a Tabela III, serão utilizados estrategicamente apenas os valores extremos, sendo os intermediários calculados pela interpolação polinomial em função dos dados do componente em análise. Neste sentido foram construídos descritores associados aos PVF os quais servem para se encontrar estes *ratings*, nivelando o entendimento e orientando a construção da taxa de atratividade correta para cada ramo da árvore de decisão.

A seguir cada descritor é detalhado para seu respectivo PVF:

**-Construção descritores para o PVF <Tamanho>:** Considerando que os equipamentos de Manufatura Aditiva Metálica apresentam área limitada para deposição, foram criados 4 componentes *dummies* com condições de impressão no equipamento EOS M280 utilizado como referência [12]. A partir destes *dummies* definiu-se um índice de perda para fabricação (Fig.3):

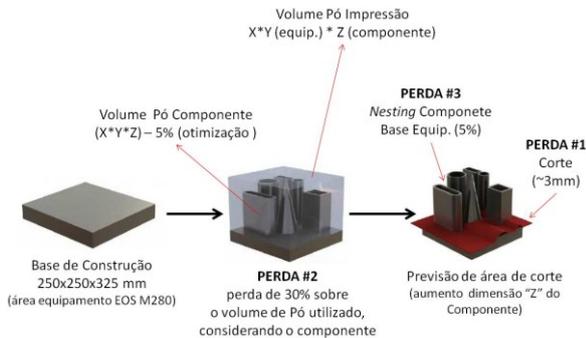


Fig.3- Índice de Perda para Fabricação Aditiva Metálica.

Este índice objetiva identificar o *dummy* que apresenta a menor perda de pó metálico, em relação a base da impressora EOS M280. Não necessariamente isto representa lotes unitários de impressão, mas o melhor aproveitamento do pó metálico. Vale ressaltar que nem todo o material utilizado durante a construção de um determinado componente poderá ser reaproveitado, representando uma perda de aproximadamente 30% [13]. A Fig. 4 apresenta a curva de perda de material (pó metálico de titânio) em relação ao tamanho dos componentes *dummies* e seu lote de impressão:

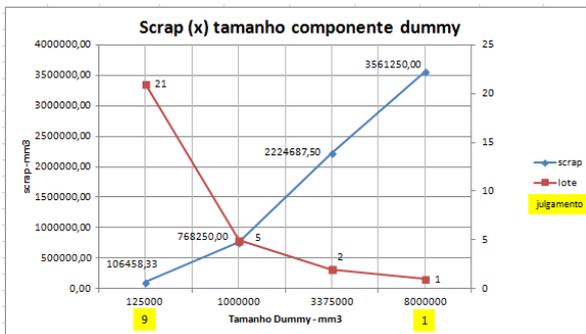


Fig.4- Relação Perda de Pó Metálico em relação ao tamanho do Componente Dummy e lote de impressão.

Uma vez construído o gráfico com base nos descritores, uma função interpoladora foi encontrada em conjunto com o *rating* do julgamento semântico para os componentes genéricos. Isto significa que a menor perda de pó (*scrap*) em função do tamanho e lote do *dummy* representa "9" e a maior "1" na escala semântica.

Neste contexto, o tamanho componente usinado que se deseja analisar será comparado ao gráfico da Fig.4,

determinando-se assim sua função de valor proporcional para o ramo da árvore em questão.

**-Construção descritores para o PVF <Complexidade>:** A complexidade de fabricação de um componente está relacionada com os parâmetros de projeto (geometria, dimensional, escolha de materiais, especificações, definições de ferramentas, etc) que influenciam o tempo de execução, os custos e a qualidade deste componente em um determinado processo de fabricação (KERBRAT, 2009). No que se refere a componentes metálicos usinados, o artigo propõe a criação de um Índice Global de complexidade a partir da análise do volume de cavaco ( $V_{cavaco}$ ) gerado em relação ao volume do *blank* ( $V_{blank}$ ) e do tempo de usinagem total ( $th$ ) do componente em análise. Criando-se uma análise simulada a partir dos componentes *dummies* determinou-se o seguinte gráfico (Fig.5):

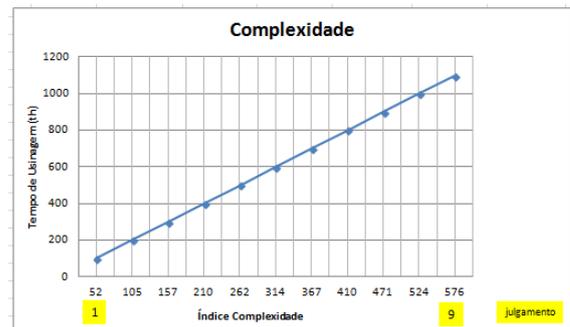


Fig. 5- Índice Global de Complexidade com base na relação Volume de Cavaco, Volume Blank e Tempo de Usinagem do Componente *dummy*.

O Índice Global procura balancear de forma simplificada os elementos dimensionais do componente sem a necessidade de avaliar a ferramenta, sua velocidade de corte e avanço conforme proposto por [18]. Uma vez construído o gráfico com base nos descritores, uma função interpoladora foi encontrada em conjunto com o *rating* do julgamento semântico para os componentes genéricos. Isto significa que o menor tempo de usinagem ( $th$ ) em função da complexidade aparente do *dummy* representa "1" (item simples) e o maior "9" (item complexo) na escala semântica.

Neste contexto, o índice de complexidade do componente usinado que se deseja analisar será comparado ao gráfico da Fig. 5, determinando-se assim sua função de valor proporcional para o ramo da árvore em questão.

**-Construção descritores para o PVF <custos>:** As condições econômicas de usinagem são partes essenciais na verificação e otimização de processos de manufatura. Os custos envolvidos na produção de uma peça podem ser divididos em duas categorias: custos diretos (ocupação das máquinas e dos operadores) e os custos indiretos (controle de qualidade, custo da matéria prima, custo da mão-de-obra indireta etc) [14]. Para o artigo será considerado apenas os custos diretamente envolvidos com o produção de uma peça genérica usinada, com base no que foi proposto por [15]

$$KF = K_{ML} \left( \frac{t_r}{m} + t_n \right) + K_{ML} + t_h \cdot \frac{t_h}{T} \cdot (K_{ML} \cdot t_w + K_{WT}) \quad (1)$$

onde:

- $K_F$  - custo de fabricação por peça [\$/peça]
- $K_{ML}$  - custo de máquina e operador por hora [\$/h]
- $K_{WT}$  - custo de ferramenta por vida [\$/]
- $t_r$  - tempo de preparação [min]
- $t_n$  - tempos secundários [min]
- $t_h$  - tempo principal [min]
- $t_w$  - tempo de troca da ferramenta [min]
- $T$  - vida da ferramenta [min]
- $m$  - tamanho do lote

Conforme (1) é necessário que se tenha uma noção clara dos custos, tempos de usinagem, vida útil da ferramenta, tempo de preparação e o custo de máquina/operador. Criando-se uma análise simulada para os *dummies* a partir de (1) foi determinado o seguinte gráfico (Fig.6):

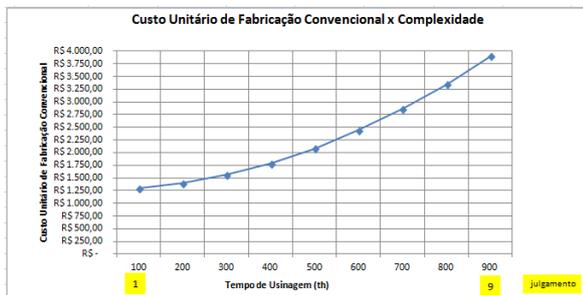


Fig. 6- Gráfico do Custo de Fabricação Convencional em relação ao Tempo de Usinagem (th) para componentes genéricos.

Uma vez construído o gráfico com base nos descritores, uma função interpoladora foi encontrada em conjunto com o *rating* do julgamento semântico simples. Isto significa que o menor tempo de usinagem (th) em função do tamanho do *dummy* representa "1" (item baixo custo) e o maior "9" (item alto custo) no *rating* da escala semântica. Neste contexto, o custo unitário do componente usinado que se deseja analisar será comparado ao gráfico da Fig. 6, determinando-se assim sua função de valor proporcional para o ramo da árvore em questão.

#### IV. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO GLOBAL

Inicialmente, a avaliação do desempenho global sumariza as ponderações dos *dummies* em relação aos PVFs, critérios e seus descritores através de um *scoring models* [16]:

$$S_j = \sum_i w_i \cdot r_{ij} \quad (2)$$

onde:

- $S_j$  - Função Global de Valor (*Score*)
- $w_i$  - peso do julgamento semântico para cada PVF (Tabela II)

$r_{ij}$  - taxa de atratividade (*rating*) resultado da função interpoladora para o critério (i) em relação ao PVF (j) (Tabela III)

O objetivo de (2) é criar capacidade de julgamento quantitativo de maneira a demonstrar potencial aderência ou não de componentes usinados ao processo aditivo. Adicionalmente as interpolações, criou-se uma escala que pontua o *scoring* encontrado em 2 zonas de decisão (aditiva, protótipo/convencional), através de uma transformação linear positiva [5]:

$$v(.) = a.m(.) + b \quad (3)$$

onde:

$v(.)$  - é a função transformada

$m(.)$  - é a função de valor (escala de intervalos) original

$a$  e  $b$  - são as duas constantes (sendo que  $a > 0$ )

A Fig. 7 exemplifica a transformação linear positiva aplicada a escala utilizada na análise global da árvore de decisão:

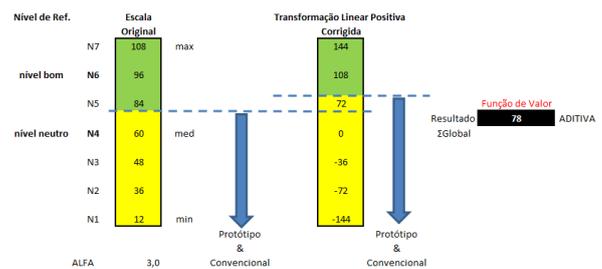


Fig. 7 - Escala corrigida para análise do desempenho global.

#### V. APLICAÇÃO EM UM ESTUDO DE CASO

Sumarizando-se os pontos tratados anteriormente, criou-se no Excel uma versão preliminar desta árvore para verificação de aderência de um componente aeronáutico usinado em relação ao processo aditivo.

O componente selecionado para o estudo de caso é um *bracket* não estrutural utilizado no içamento do motor GE CF34-8E [17] (Fig.8):

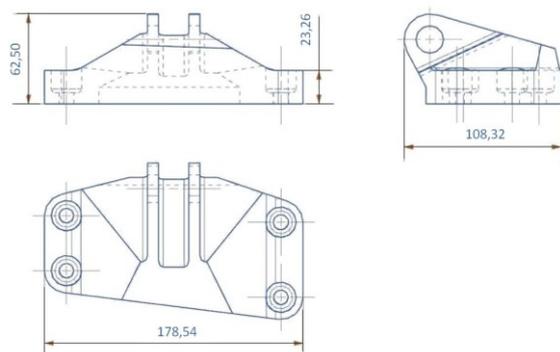


Fig. 8 - Componente selecionado para o estudo de caso.

Principais características do componente piloto:

- Tempo de Usinagem: 753 min (equipamento Romi D800 com 3 eixos)
- Tempo de preparação (setup): 90 min
- Custo unitário de fabricação: R\$ 3.188,90
- Blank: 179x108x63 mm (compatível com impressora EOS M280)
- Material: Ti6Al4V (compatível com impressora EOS M280)

Partindo-se da árvore apresentada na Fig. 2, da conceituação dos descritores e dos dados do *bracket* usinado, criou-se uma análise específica (Fig.9):

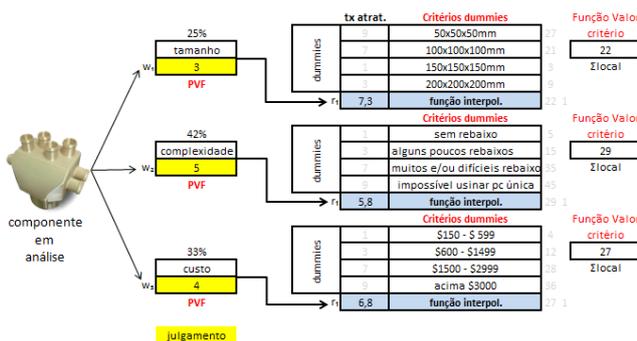


Fig. 9- Árvore de Decisão para Análise do Componente piloto.

Como resultado desta análise de *scoring* global, foi gerado o seguinte gráfico (Fig. 10):

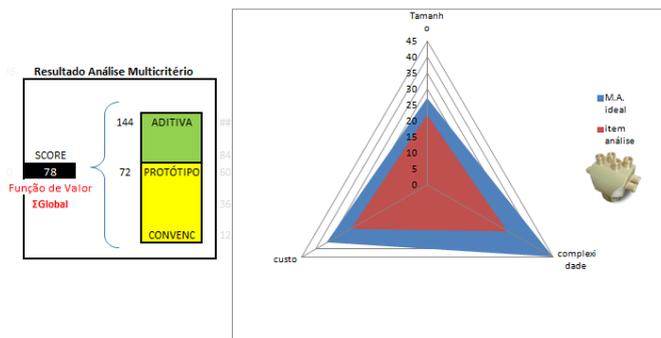


Fig. 10- Gráfico de aderência do Componente piloto.

Conforme a Fig. 10, o desempenho global do componente em análise é representado pela área em *vermelho* do gráfico em comparação a um componente impresso ideal (área *azul*). Segundo escala estabelecida pelo método, o *bracket* originalmente usinado pode ser enquadrado como candidato a ser fabricado de forma aditiva.

## VI. CONCLUSÃO

As tecnologias aditivas tem evoluído rapidamente, porém sua adoção em larga escala esbarra, de certa forma, na falta de modelos de análise que orientem os decisores na transição

tecnológica. A maior dificuldade encontrada-se justamente no estabelecimento de critérios claros para julgamento e avaliação de aderência de componentes usinados no que tange ao processo aditivo. O presente artigo através dos resultados preliminares obtidos com a aplicação do método em um componente piloto, apresenta potencial avanço na determinação deste critérios. Por outro lado, faz-se necessário sua aplicação em diferentes componentes usinados, a fim de se validar de forma mais ampla sua real contribuição.

Adicionalmente, ensaios de resistência em corpos de prova impressos são necessários para validação do processo alternativo em relação as especificações de engenharia do componente em análise. Certificações adicionais também poderão ser demandadas por Órgãos reguladores.

## REFERÊNCIAS

- [1] GONÇALVES, T. J. (2012). Reconfiguração da Strategic Choice Approach sob a Perspectiva do Apoio Multicritério à Decisão. Dissertação de Mestrado- Curso de Engenharia Aeronáutica e Mecânica, área de Produção -Instituto Tecnológico de Aeronáutica , p. 190 pag.
- [2] OLIVEIRA, H. S. de; et al. Caracterização mecânica e microestrutural da liga ti-6al-4v após tratamento superficial com laser pulsado. In: 15º ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA – XV ENCITA. 15., 2009. Anais... São José dos Campos: ITA, 2009.
- [3] OESTREICH, D.H.; MOSQUEN, A.; STOFFEL, D.R.; SOUZA, A.J.. Revisão da Literatura sobre a Usinabilidade do Titânio e suas Ligas. 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF). Caxias do Sul, RS. 2011
- [4] ENSSLIN, L., MONTIBELLER, G. N., & NORONHA, S. M. (2001). Apoio à Decisão. Metodologia para Estruturação de Problemas e Avaliação Multicritério de Alternativas. Florianópolis: Insular.
- [5] MONTIBELLER, G., & FRANCO, A. (2010). Multi-Criteria Decision Analysis for Strategic. Handbook of Multicriteria Analysis, Applied.
- [6] BERMAN, B. 3D printing: the new industrial revolution. Business Horizons. v. 55, n.2, p. 155-162, 2012.
- [7] MILOVANOVIC, J.; STOJKOVIC, M.; TRAJANOVIC, M. Metal laser sintering for rapid tooling in application to tyre tread pattern mould. Serbia: INTECH, 2012.
- [8] GUO, N.; LEU, M. C. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. Frontiers of Mechanical Engineering, v. 8, n. 3, p. 215-24, 2013
- [9] MANÇANARES, C.; et al. Additive manufacturing process selection based on parts selection criteria. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. v. 80, n. 5, p. 1007-1014, 2015.
- [10] THOMAS, D.; GILBERT, S. W. Costs and cost effectiveness of additive manufacturing: a literature review and discussion. NIST, 2014.
- [11] BANA e COSTA, C. A., & VANSNICK, J. C. (Junho de 1995). Uma Nova Abordagem ao problema de Construção de uma Função de Valor Cardinal. Investigação Operacional, vol. 15 , pp. 15-35
- [12] EOS. Systems et solutions for additive manufacturing. 2016
- [13] ATZENI, E.; SALMI, A. Economics of additive manufacturing for end-useable metal parts. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.62, n. 9, p. 1147-1155, 2012
- [14] DINIZ, A.; MARCONDES, F.; COPPINI, N. Tecnologia da usinagem dos materiais. São Paulo: Artliber., 2013
- [15] CASTILLO, W.J.G., Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal duro com canais retos. 2005. 134f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil
- [16] ANDERSON, D.; SWEENEY, D.; WILLIAMS, T. Quantitative methods for business. Mason. Ohio: South-Western College Publishing, 2001

- [17] GRABCAD. GE jet engine bracket challenge, 2013
- [18] KERBRAT, G. Methodologie de conception d'outillages modulaires hybrides basee sur l'evaluation quantitative de la complexite de fabrication. Thèse de Doctorat. École Centrale de Nantes. SPIGA-Sciences Pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture. 2009