



## UTILIZAÇÃO DA FOTOGRAMETRIA PARA A INSPEÇÃO DE COMPONENTES METÁLICOS FABRICADOS POR MANUFATURA ADITIVA NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0.

Congresso Brasileiro De Manufatura Aditiva, 1ª edição, de 30/11/2020 a 01/12/2020  
ISBN dos Anais: 978-65-86861-62-4

COELHO; Daniel de Moraes <sup>1</sup>, PAES; Luiz Eduardo <sup>2</sup>, GUARATO; Alexandre Zuquete <sup>3</sup>, SCOTTI; Fernando Matos <sup>4</sup>, VILARINHO; Louriel de Oliveira <sup>5</sup>

### RESUMO

#### RESUMO

A inspeção de componentes constitui um dos pilares da indústria atual. Entretanto, a necessidade de deslocamento de inspetores até os locais de fabricação das peças pode ser um obstáculo devido a diversos fatores, como o custo e o tempo envolvidos. Além destes, o cenário de pandemia desfavorece atividades presenciais e corrobora com alternativas remotas em todos os aspectos da sociedade, incluindo a indústria. Sendo assim, este trabalho propõe uma ligação direta entre as duas áreas da Indústria 4.0 (Manufatura Aditiva e Realidade Aumentada) através do estudo da aplicação da Fotogrametria, uma técnica de escaneamento 3D, em uma peça fabricada mediante o processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco. É proposta também uma metodologia de baixo custo, com a utilização de softwares *open source* que permitem a inspeção visual de peças de forma remota. O modelo obtido através da Fotogrametria foi comparado com um obtido com um escâner 3D a laser com precisão de até 0,04 mm e apresentou uma discrepância média de 0,1 mm. Diante do exposto, a Fotogrametria pode ser considerada como uma alternativa viável e de baixo custo para a inspeção visual de peças.

**Palavras-chave:** Escaneamento 3D; Baixo custo; Inspeção remota; Impressão 3D.

### INTRODUÇÃO

Entre a segunda metade do século XVIII e meados do século XIX houve a Primeira Revolução Industrial, que deu início à produção mecânica, incentivada pela construção de ferrovias e pela invenção da máquina a vapor. Entre meados do século XIX e a primeira metade do século XX ocorreu a Segunda Revolução Industrial, caracterizada pelo advento da eletricidade e da linha de montagem, o que deu origem às linhas de produção em massa. A Terceira Revolução Industrial, ocorrida na segunda metade do século XX foi impulsionada pelo desenvolvimento dos semicondutores e da computação (SCHWAB, 2018).

A Indústria 4.0, também denominada de 4ª Revolução Industrial (BITKOM et al., 2015), iniciou-se na primeira década do século XXI e caracteriza-se pela digitalização da produção, fundindo o real com o virtual (SCHWAB, 2018). Isso colaborou tanto com a personalização da produção em massa, com a internet ubíqua, sensores menores e mais poderosos e a inteligência artificial, quanto com mudanças na forma de produção e de consumo da sociedade (SCHWAB, 2018).

Os nove pilares tecnológicos da Indústria 4.0, definidos pelo Boston Consulting Group (BCG), são: internet das coisas, realidade aumentada, robôs autônomos, simulação, manufatura aditiva, big data, tecnologia de nuvem, cybersecurity e integração horizontal e vertical de sistemas e softwares (ALBERTINI et al., 2017).

A Realidade Aumentada (RA) foi revolucionária por melhorar a transferência de informações entre os mundos digital e físico (ROMERO, 2016). O termo Realidade Aumentada foi definido por Azuma (1997) como sendo uma variação de ambientes virtuais, já que esta permite ao usuário ver o mundo real, com objetos virtuais sobrepostos ou compostos com o mundo real (ALBERTINI et al., 2017).

Sendo assim, a RA pode ser utilizada com o intuito de aumentar a produtividade em diversas atividades da Indústria, desde as básicas até as de suporte para processos de manutenção, treinamento (ALBERTINI et al., 2017), como também inspeção de peças. Sua aplicação poupa, por exemplo, o deslocamento de inspetores até os locais de fabricação das peças, diminuindo os custos e o tempo envolvidos no processo. Além disso, o cenário atual de pandemia desfavorece atividades presenciais e corrobora com alternativas remotas em todos os aspectos da sociedade, incluindo a indústria.

A Manufatura Aditiva (MA), por sua vez, é definida como um grupo de tecnologias que utiliza uma abordagem camada por camada para criar objetos com forma livre, da base ao topo. A MA consiste em converter um modelo CAD 3D em camadas, e a partir dessa informação determinar a trajetória (linguagem CNC) e os parâmetros de deposição, que posteriormente são processados por quatro componentes básicos: controlador CNC, sistema de movimentação, fonte de energia, e um sistema alimentação de material de adição (GIBSON et al., 2010).

A Realidade Aumentada pode ser aplicada através do escaneamento 3D de peças de diversas formas diferentes. Uma das alternativas utilizadas vastamente na Indústria é o escaneamento sem contato, por triangulação. Esta categoria engloba tanto a Fotogrametria quanto scanners a laser.

Segundo a *American Society of Photogrammetry*, a definição deste termo é "a arte, ciência e tecnologia de obtenção de informação confiável sobre objetos físicos e o meio ambiente por meio de processos de gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética radiante e outras fontes." Este processo de digitalização é baseado no princípio de obtenção de um modelo CAD por meio de fotografias registradas por uma câmera digital e, posteriormente, processadas por um software específico (AHRENS et al., 2013).

Já o escaneamento 3D é um método de varredura de alta exatidão e precisão que permite a captura automática de grande quantidade de dados em curto espaço de tempo (GROETELAARS et al., 2011).

A Fotogrametria possui diversas vantagens, como a rápida obtenção dos dados, poder ser aplicada a peças com geometrias complexas, não apresentar restrição quanto ao peso e material (desde que seja preparado) da peça, possuir precisão de até algumas dezenas de micrometros e possuir um equipamento de fácil transporte (PAHOLE et al., 2005; SOKOVIC e KOPAC, 2006). Além disso, segundo Remondino (2006), na Fotogrametria, quando utilizadas câmeras digitais convencionais e softwares comerciais, é uma técnica de baixo custo, portátil e com flexibilidade. Entretanto, possui desvantagens como a presença de desvios da geometria quando utilizadas diferentes distâncias focais (SOKOVIC e KOPAC, 2006) e a sensibilidade à reflexão de alguns materiais.

Sendo assim, este trabalho contempla dois pilares da Indústria 4.0: Realidade Aumentada e Manufatura Aditiva. Propõe a utilização da Fotogrametria na inspeção remota de uma peça fabricada por manufatura aditiva mediante uma metodologia de baixo custo.

### METODOLOGIA

A primeira etapa deste trabalho consistiu na seleção do objeto de estudo. Foi escolhida uma peça fabricada a partir do processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (Figura 1) com dimensões aproximadas de: altura 3,5 cm; diâmetro externo 11,5 cm e diâmetro interno 7,5 cm.



Figura 1: Peça fabricada pelo processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco.

Esta peça foi escolhida pois fornece diversos desafios para o processo de Fotogrametria como certo grau de refletividade e, por consequência, uma metodologia eficiente para realizar o escaneamento através deste processo apresentará elevada aplicabilidade em outras circunstâncias.

Foi utilizada uma câmera fotográfica DSLR, Nikon D5300, com lente NIKKOR 18-55 mm em um tripé, com os seguintes parâmetros fixos para registrar as fotografias a serem utilizadas no processo de Fotogrametria: distância focal de 29 mm, abertura f/25, ISO-2500 e tempo de exposição 1/30 segundos. A iluminação utilizada foi advinda de duas lâmpadas LED de 1,4 W de potência, posicionadas de acordo com a Figura 2, de forma que houvesse o mínimo de sombra na superfície da peça nas fotografias. Além disso, como também pode ser observado na Figura 2, foi utilizada uma plataforma rotativa, na qual a peça estava posicionada centralizada. Este recurso possibilitou uma maior eficiência no processo de adquirir as imagens, pois a câmera fica estacionária enquanto a peça é rotacionada.

<sup>1</sup> Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, danielcoelho@ufu.br

<sup>2</sup> Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, luiz.paes@ufu.br

<sup>3</sup> Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, azguarato@ufu.br

<sup>4</sup> Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, fernandomscotti@gmail.com

<sup>5</sup> Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, vilarinho@ufu.br



Figura 2: Vista frontal da bancada para o registro das fotografias utilizadas na confecção do modelo 3D a partir do processo de Fotogrametria.

Para a confecção dos modelos, foi definido que seriam registradas 24 fotografias a cada 360°, ou seja, um intervalo de 15° entre cada foto. Isto foi feito visando elevada sobreposição das imagens, uma vez que a peça apresenta um padrão de textura que se mantém semelhante na maior parte da superfície desta e pode ser facilmente confundido pelo software utilizado para o alinhamento das imagens. Foi estipulado o número de 7 voltas na peça, totalizando 168 fotografias, variando-se o parâmetro "h" indicado na Figura 3 e o foco entre a parte externa e interna (sempre com a câmera direcionada para o centro da peça).

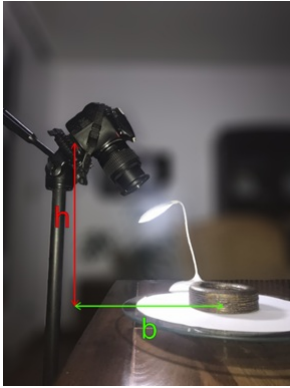


Figura 3: Vista lateral da bancada para o registro das fotografias utilizadas na confecção do modelo 3D a partir do processo de Fotogrametria.

O parâmetro "b" representa a distância horizontal entre o centro da peça e o centro da base da câmera fotográfica; este foi mantido constante com o valor de 25 cm. O parâmetro "h" representa a distância vertical entre o plano da plataforma rotativa e o centro da base da câmera fotográfica. A Tabela 1 apresenta a variação de "h" juntamente com a variação do foco das imagens nas 7 voltas.

Tabela 1: Altura da câmera e foco das imagens a cada volta na peça.

Volta	Altura "h" [cm]
Foco	
1	27
Interior	2
2	24
Interior	3
3	21
Interior	4
4	18
Interior	5
5	18
Exterior	6
6	15
Exterior	7
7	12
Exterior	

As voltas 4 e 5 apresentam mesma altura e focos diferentes (Tabela 1). Isto foi feito para auxiliar no alinhamento das fotografias pois, mesmo com a abertura da lente em f/25, não foi possível manter a peça inteira em foco em uma única imagem.

Outra estratégia utilizada para auxiliar neste mesmo aspecto foi a inscrição de caracteres aleatórios na plataforma rotativa (Figura 4), de forma que estes estivessem estáticos em relação ao objeto de estudo. Como estes contrastam com a superfície branca e lisa na qual a peça se encontra, eles se destacam e são facilmente alinhados e detectados pelo software, auxiliando na geração do modelo 3D.

<sup>1</sup> Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, danielcoelho@ufu.br  
<sup>2</sup> Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, luiz.paes@ufu.br  
<sup>3</sup> Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, azguarato@ufu.br  
<sup>4</sup> Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, fernandomscotti@gmail.com  
<sup>5</sup> Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, vilarinho@ufu.br



Figura 4: Caracteres aleatórios dispostos no plano da plataforma rotativa, ao redor e no interior do objeto de estudo.

Após a aquisição de todas as 168 fotografias, estas foram importadas para o software *open source* Meshroom no qual foi realizado o processamento e a geração do modelo 3D da peça. Pode-se observar a interface do software com o projeto em questão na Figura 5.A e o modelo 3D gerado por este na Figura 5.B.

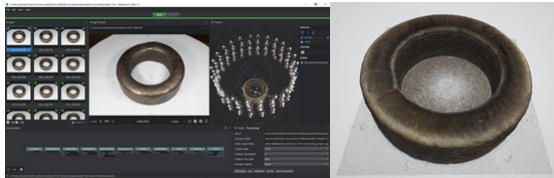


Figura 5: Interface do software *open source* Meshroom (A) com o modelo gerado através da Fotogrametria (B).

Para realizar a validação do modelo adquirido através da Fotogrametria, de forma análoga ao trabalho de Vacca (2019) foi proposto escanear o objeto de estudo com um escâner 3D e importar os dois modelos no software Cloud Compare para compará-los. O escâner utilizado para a confecção do modelo de referência, ou padrão, foi o escâner a laser CREAFORM HandySCAN 307.

O HandySCAN é um sistema de aquisição de dados que independe de escalas externas, pois este conta com um sistema de posicionamento interno. Este escâner utiliza triangulação para determinar a posição relativa do objeto escaneado em tempo real e precisa estar conectado a um computador com o software VX Elements (Figura 6) no qual o modelo vai sendo construído enquanto o objeto é escaneado. O equipamento conta com 2 câmeras, 7 lasers cruzados, uma área de escaneamento de 275x250 mm, realiza 480.000 medições por segundo e tem precisão de até 0,040 mm.

Antes de escanear a peça, foi necessário calibrar o escâner com o gabarito fornecido pela empresa e ajustar seu obturador para a luz ambiente. De forma análoga ao processo de fotogrametria foi utilizada uma plataforma rotativa como base tanto para o objeto de estudo quanto para os alvos de referência do escâner, que devem estar estáticos em relação à peça e com um distanciamento de 50 - 100 mm de distância um dos outros.

Foi realizado um escaneamento com a peça em sua orientação normal, e outro com esta invertida. Após os dois escaneamentos serem realizados, eles foram unidos, formando um modelo único. Isto foi feito pois a superfície interna localizada na parte inferior da peça é de difícil visualização para o escâner e o modelo final pode ser observado na Figura 6.

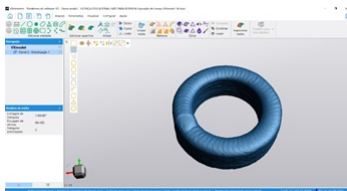


Figura 6: Interface do software VX Elements com os dois modelos gerados com o escâner 3D já fundidos.

Uma vez que ambos os modelos estavam prontos, no software *open source* Cloud Compare, foi feito o alinhamento e o ajuste de escala das nuvens de ponto do modelo obtido por Fotogrametria, tomando a nuvem de pontos do modelo gerado pelo Escâner como referência. A Figura 7 retrata as nuvens de pontos dos modelos sobrepostas.

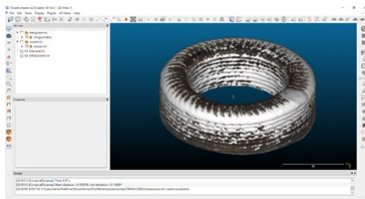


Figura 7: Interface do software Cloud Compare com as nuvens de pontos oriundas dos dois modelos alinhadas.

Ainda neste software foi feita uma comparação entre as distâncias das nuvens de pontos dos dois modelos pelo cálculo da distância mínima entre cada ponto dos modelos usando o algoritmo do vizinho mais próximo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O HandySCAN é um escâner a laser, por isso o modelo gerado tem uma superfície opaca, que não representa visualmente o objeto de estudo. Em contrapartida, o modelo gerado a partir da Fotogrametria representa a peça visualmente, com sua textura estampada no modelo, uma vez que esse processo funciona com base em fotografias.

A nuvem de pontos do modelo gerado a partir do processo de Fotogrametria apresentou uma distância média de 0,1 mm em relação à nuvem de pontos do modelo de referência obtido pelo escâner 3D. Foi obtido também um modelo da peça com um campo escalar no qual pode-se observar a discrepância em toda a superfície do modelo, conforme mostrado na Figura 8. Também foi gerado um histograma (Figura 9), que mostra a distância média da classe de distância absoluta.

<sup>1</sup> Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, danielcoelho@ufu.br

<sup>2</sup> Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, luiz.paes@ufu.br

<sup>3</sup> Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, azguarato@ufu.br

<sup>4</sup> Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, fernandomscotti@gmail.com

<sup>5</sup> Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, vilarinho@ufu.br

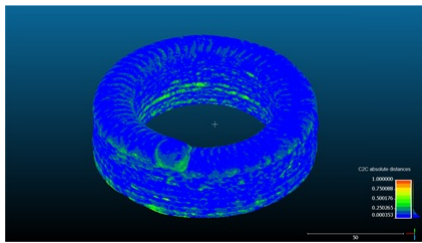


Figura 8: Discrepância (mm) entre modelo obtido por Fotogrametria e por escâner 3D.

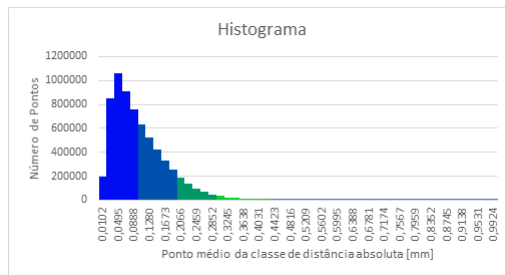


Figura 9: Histograma entre modelo obtido por Fotogrametria e por escâner 3D.

Este resultado condiz com o esperado, pois, no trabalho de Vacca (2019) foi analisada uma estrutura de 28 m de diâmetro e foi encontrada uma distância média de 0,03 m; ou seja, houve uma razão de  $1,07 \cdot 10^{-3}$ . Neste trabalho, a peça analisada apresentava aproximadamente 115 mm de diâmetro externo e a distância média entre os modelos por Fotogrametria e escâner 3D apresentada foi de 0,1 mm; ou seja, razão de  $8,69 \cdot 10^{-4}$ .

## CONCLUSÃO

A fotogrametria é um processo de escaneamento 3D que apresenta vantagens e desvantagens. Há algumas limitações em relação a materiais e geometrias que são possíveis de serem escaneadas, entretanto, uma característica deste processo imprescindível na inspeção visual é a presença de textura. Enquanto o modelo gerado pelo escâner 3D apresenta elevada precisão, este não pode ser utilizado para o fim proposto neste trabalho pois este equipamento gera um modelo apenas com os aspectos geométricos da peça e não visuais.

Por isso este trabalho propôs analisar o quão viável a fotogrametria é para a inspeção de peças, para possibilitar que esta seja feita remotamente e com baixo custo.

Os softwares *open source* utilizados tanto para a geração do modelo através da Fotogrametria, quanto para o cálculo da discrepância entre os modelos se mostraram eficientes e suficientes para tais tarefas. E o resultado final apresentou discrepância média entre os modelos de 0,1 mm, demonstrando a precisão da fotogrametria para este propósito.

Sendo assim, a Fotogrametria pode ser considerada como uma alternativa viável e de baixo custo para a inspeção visual de peças.

## REFERÊNCIAS

- AHRENS, C.H.; VELLWOCK, A.E.; PFEIFER, D.C.; PISTORELLO, R. Engenharia reversa por meio de fotogrametria: estudo comparativo da técnica de digitalização tridimensional visando aplicação na manufatura aditiva. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. 7ª. Itaitiaia, RJ. 2013. **Anais...** Disponível em: <http://www.swge.inf.br/siteCOBEF2013/anais/PDFS/COBEF2013-0256.PDF>. Acesso em 20 outubro 2020.
- ALBERTIN, M.R.; ELIENESIO, M.L.B.; AIRES, A.S.; PONTES, H.L.J.; ARAGÃO JUNIOR, D.P. Principais inovações tecnológicas da indústria 4.0 e suas aplicações e implicações na manufatura. SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. 24. Bauru. **Anais...** 2017. Bauru: UNESP. 13 p. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Dmontier\\_Jr/publication/321682376\\_PRINCIPAIS\\_INOVACOES\\_TECNOLOGICAS\\_DA\\_INDUSTRIA\\_40\\_E\\_SUAS\\_APLICACOES\\_E\\_IMPLICACOES\\_NA\\_MANUFATURA/links/5a2ab3a107e9b63e538ae477/INOVACOES-TECNOLOGICAS-DA-INDUSTRIA-40-E-SUAS-APLICACOES-E-IMPLICACOES-NA-MANUFATURA.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Dmontier_Jr/publication/321682376_PRINCIPAIS_INOVACOES_TECNOLOGICAS_DA_INDUSTRIA_40_E_SUAS_APLICACOES_E_IMPLICACOES_NA_MANUFATURA/links/5a2ab3a107e9b63e538ae477/INOVACOES-TECNOLOGICAS-DA-INDUSTRIA-40-E-SUAS-APLICACOES-E-IMPLICACOES-NA-MANUFATURA.pdf). Acesso em 23 outubro 2020.
- AZUMA, R.T. A Survey of Augmented Reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, vol. 6, no. 4, pp. 355-385, 1997.
- BITKOM e.V.; VDMA e.V.; ZVEI e.V. **Implementation Strategy Industrie 4.0**: report on the results of the Industrie 4.0 platform. Frankfurt, Alemanha, 2015.
- GIBSON, I.; ROSEN, D.W.; STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**. 2ª Ed. New York: Springer, 2015. 498 p.
- GROETELAARS, N.J.; AMORIM, A.L. Tecnologia 3D laser scanning: características, processos e ferramentas para manipulação de nuvens de pontos. IBEROAMERICAN CONGRESS OF DIGITAL GRAPHICS. 15. Santa Fe, Argentina, **Anais...** p. 490-494, 2011.
- PAHOLE, I.; DRSTVENSEK, I.; FICKO, M.; BALIC, J. Rapid prototyping processes give new possibilities to numerical copying techniques. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 164-165, p. 1416-1422. 2005.
- REMONDINO, F.; EL-HAKIM, S. Image-based 3D modelling: a review. **The photogrammetry record**, vol. 21, p.269-291. 2006.
- ROMERO, D.; STAHERE, J.; WUEST, T.; NORAN, O.; BERNUS, P.; FAST-BERGLUND, A.; GORECKY, D. Towards an operator 4.0 typology: a human-centric perspective on the fourth industrial revolution Technologies. INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTERS & INDUSTRIAL ENGINEERING (CIE46). 2016, Tianjin, China. **Proceedings...** Nova York, EUA: Curran Associates, Inc., 2017. p. 1-11.
- SCHWAB, K. **A quarta revolução industrial**. São Paulo: Edipro, 2018. 160 p.
- SOKOVIC, M.; KOPAC, J. RE (reverse engineering) as necessary phase by rapid product development. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 175, p. 398-403. 2006.
- VACCA, G. Overview of open source software for close range photogrammetry. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences**, vol. 42, n° 4/W14, p239-245. 2019.

**PALAVRAS-CHAVE:** Escaneamento 3D, Baixo custo, Inspeção remota, Impressão 3D.

<sup>1</sup> Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, danielcoelho@ufu.br

<sup>2</sup> Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, luiz.paes@ufu.br

<sup>3</sup> Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, azguarato@ufu.br

<sup>4</sup> Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, fernandomscott@gmail.com

<sup>5</sup> Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, vilarinho@ufu.br