

ANÁLISE DOS ERROS GEOMÉTRICOS E DIMENSIONAIS NA USINAGEM DE PEÇAS COM GEOMETRIA COMPLEXA UTILIZANDO SPLINES NA GERAÇÃO DOS ESBOÇOS NO CAD 3D

Micael Mattei¹

Alexandre Milanez²

Resumo: A usinagem é uma área importante na fabricação mecânica, onde procura-se contínuas melhorias na qualidade de fabricação do produto, com a redução de custo e tempo na fabricação de peças a partir do uso do CAD/CAM. Através destes recursos busca-se maior facilidade no uso, como também uma melhor precisão no desenvolvimento de peças de geometrias complexas. Porém, durante a fabricação de peças com formas geométricas complexas, diferentes fatores podem influenciar em erros dimensionais e geométricos. Levando em consideração estes fatores e justificando o alto custo em máquinas e equipamentos, necessários para o desenvolvimento de uma geometria complexa, o objetivo deste trabalho é avaliar o modelamento de uma peça de geometria complexa na plataforma CAD, até sua inspeção final, utilizando Splines na geração do desenho CAD. Para avaliar os erros dimensionais e geométricos, foi utilizado uma máquina de medição de coordenadas para analisar as diferenças geométricas entre a peça teórica e a usinada. O estudo revelou erros que impactaram na qualidade dimensional e geométrica da peça, influenciado pelo modo de construção dos desenhos com o uso de Splines. De uma forma geral, o trabalho demonstrou as dificuldades encontradas na fabricação de geometrias complexas e que para encontrar uma solução para minimizar os possíveis erros, deve se conhecer as fontes dos erros e trabalhar para minimizar suas influências sobre o resultado final da usinagem.

Palavras-chave: CAD/CAM. Geometrias Complexas. Precisão na Usinagem. Splines.

1. INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo de fabricação muito utilizado para fabricar produtos com geometrias complexas (Ferreira, 2013). A usinagem é um ato de dar forma à uma matéria bruta, ou seja, um processo cujo propósito é gerar um formato em uma matéria prima por meio de máquinas e ferramentas, utilizando processos manuais e programáveis (Mecânica Industrial, 2020).

¹ Graduando em Engenharia Mecânica. E-mail: micael_c.m@hotmail.com

² Prof. Alexandre Milanez. E-mail: alexandre.milanez@satc.edu.br

No processo de usinagem é comum utilizar sistemas CAD/CAM (*Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing*), projeto assistido por computador e fabricação assistida por computador, para fabricar uma peça. O CAD/CAM é o procedimento mais empregado na fabricação de peças com geometrias complexas, desde a sua elaboração por um desenho 3D até a obtenção da peça usinada.

O intuito de utilizar o CAD/CAM no processo de usinagem é facilitar a fabricação de peças por usinagem, principalmente na fabricação de geometrias complexas. Entretanto, alguns fatores podem interferir na qualidade da superfície usinada, gerando erros geométricos e dimensionais na peça.

Nos *softwares* CAD, os desvios geométricos decorrentes do modelamento de um produto, podem estar ligados a fatores como por exemplo a limitações matemáticas apresentadas pelo sistema CAD. No CAM, esses erros geométricos ocorrem devido a fatores relacionados à transferência de dados entre os sistemas CAD/CAM e desvios provenientes da programação CAM (Ferreira, 2013).

O sistema CAD/CAM tornou-se uma ferramenta importante no processo de usinagem de geometrias complexas, por este motivo, se faz necessário o reconhecimento dos fatores que interferem no desempenho de fabricação de peças que exigem elevada precisão. Segundo Ferreira (2013), é necessário o conhecimento dos fatores que influenciam no erro geométrico, para justificar o elevado investimento em máquinas e ferramentas.

Levando em consideração a necessidade de estudar esses erros, este trabalho buscou avaliar a precisão do sistema CAD/CAM na usinagem de geometrias complexas, utilizando splines na geração de desenhos CAD.

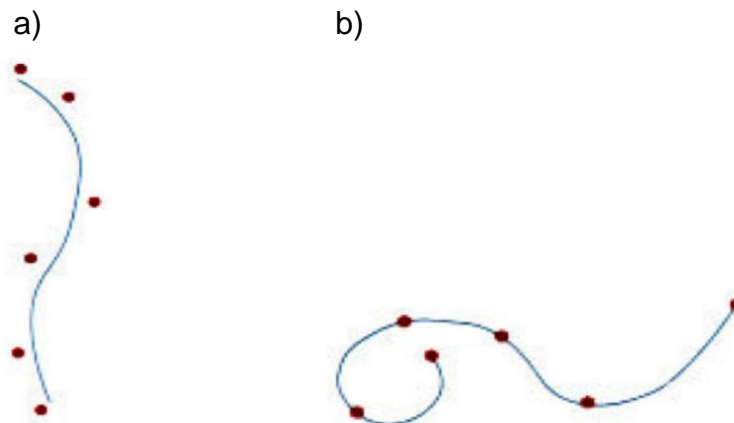
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção tem por finalidade apresentar uma revisão de literatura referente ao desenvolvimento de uma peça complexa a partir do Splines no CAD/CAM, comparando resultados em diferentes CAD, abordando embasamentos teóricos que podem estar relacionados aos principais erros dimensionais e geométricos causados durante o processo CAD/CAM e usinagem.

2.1 SPLINES

Segundo Barbarini (2007), o termo Spline é designado na matemática para definir curvas especiais formadas por segmentos de polinômios. Para Silva (2020), Spline é uma curva ou superfície construída usando uma sequência de pontos que dependem de métodos de aproximação ou interpolação. Na Fig.1 tem-se um exemplo de representação de uma interpolação e aproximação.

Figura 1 – Linhas construídas por Splines, onde: a) aproximação;
b) interpolação



Fonte: ic.uff.br, 2020.

Segundo Zoz (1999), Splines, são formas de representação de modelagem geométrica, servindo como definição visual, existindo diferentes tipos de Splines: Bezier, Casteljaú, B-Spline e Hermite. Tendo seus algoritmos um diferente do outro. O splines utilizados neste trabalho foram o B-Spline e Splines de interpolação.

2.1.1 B-splines

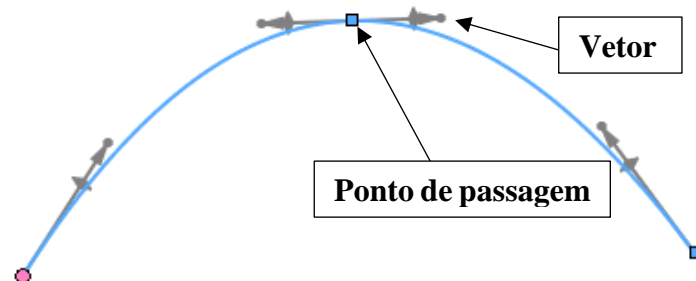
B-Splines é uma abreviação de Splines básicos (em inglês, basics splines). O termo *basics* refere-se à aplicação de uma transformação feita na variável x antes de iniciar a etapa de ajuste do modelo. O B-Spline é um polinômio definido em partes de grau m definido por uma variável x (Utpott, 2015).

As curvas formadas por segmentos de polinômios, dependo do seu grau, (Souza 2004), representam maior esforço computacional. Conforme Souza e Ulbrich

(2009) superfícies elaboradas por uma matemática complexa, podem acarretar erros na transferência de dados.

B-Splines são curvas polinomiais por partes que implementam o controle local da curva, ou seja, quando um ponto de controle é modificado somente a curva nessa região sofre alteração, em função da ordem de sua continuidade (Pereira e Carvalho, 2014).

Fig. 2 – B-Splines no SolidWorks®.



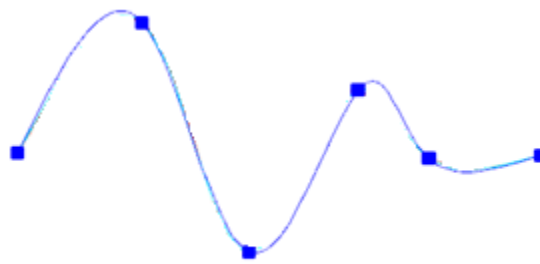
Fonte: Adaptado do SolidWorks®, 2018.

Na fig. 2 tem-se uma representação de um B-Splines empregado no SOLIDWORKS, para criar curvas complexas, em cada ponto de passagem, tem um vetor de tangência, onde consegue controlar a direção da tangência (SolidWorks, 2018).

2.1.2 Splines de Interpolação

Splines de interpolação passam por uma série de pontos, chamados pontos de ajuste, representada na Fig. 3. Quando se cria Splines utilizando pontos de ajuste, a curva resultante passa através dos pontos especificados e é influenciada pelo espaçamento dos nós matemáticos na curva (AUTODESK, 2018).

Fig. 3 – Splines de interpolação AutoDesk Inventor®.



Fonte: Adaptado do AutoDesk®, 2018.

2.2 SOFTWARE CAD 3D

O software CAD é uma plataforma utilizada no ramo das engenharias, que tem como propósito desenvolver projetos 2D/3D, 2D sendo mais aproveitado na área civil e 3D mais empregado na área da mecânica. Segundo Katsuki (2013), o CAD 3D é considerado muito importante na elaboração de qualquer peça mecânica, visto que se consegue analisar a peça desejada em 3D antes de ser fabricada.

Souza (2009), define que o CAD é um sistema utilizado para elaboração de projetos em três dimensões, trabalhando com modelamentos e detalhamentos. Mediante a esta plataforma, consegue-se trabalhar com modelagem, automação, simulação e visualização (AutoDesk, 2019).

2.2.1 Limitações Matemáticas apresentadas pelos Sistemas CAD

Conforme Souza e Ulbrich (2009) e abordado por Ferreira (2013), quando se deseja elaborar superfícies que exigem rigor de aparências, como latarias externas de um automóvel, etc., pequenas discontinuidades nas superfícies do modelo CAD 3D podem repercutir no produto final. Deve-se, então, considerar como qualidade de superfícies, o grau de suavidade, continuidade e simplicidade do equacionamento matemático adotado. Uma superfície elaborada por uma matemática complexa, pode acarretar dificuldades ou erros na transferência de dados via padrões de comunicação, como o IGES por exemplo.

2.2.2 Alterações Geométricas após Transferência de Dados entre Sistemas CAD

Segundo Holtz (2009) e abordado por Ferreira (2013), tolerâncias de exportações e importações de um conjunto de dados em formato IGES atuam diretamente no formato da nova geometria importada, assim como no cálculo de trajetória da ferramenta, que pode alterar dependendo dos valores de tolerâncias empregados. Gallaher (2002) descreve que uma pesquisa efetuada pela RTI (VDA), aponta que as dificuldades mais desafiadoras encontradas pelas empresas é como trocar os dados e dividir entre diferentes sistemas computacionais. Para Henriques (2004), uma pesquisa realizada pela VDA em parceria com BMW, ProSTEP entre outras empresas, indica que entre 201 modelos analisados, 36,4% apresentam problemas de acuracidade, demonstrando o problema de compatibilidade entre softwares projetados por diferentes fabricantes.

2.3 CAM

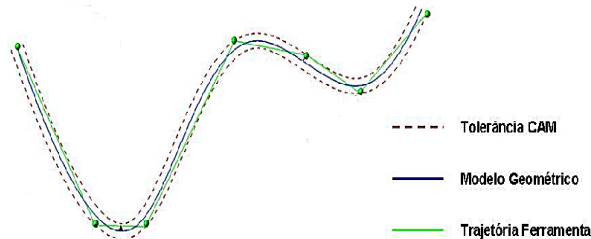
CAM são softwares utilizados para gerar a programação na usinagem em máquinas CNC (Comando Numérico Computorizado). O CNC realiza as operações de usinagem, utilizando os programas gerados pelo CAM. Segundo José Speck (2005) o CAM é uma plataforma empregada na geração de dados para a máquina CNC, por meio de códigos de comando, para efetuar a fabricação de peça, controlando a movimentação das ferramentas. É um processo onde o sistema CAM envia sinais para máquina, executando o processo de usinagem, sem a interferência direta do operador.

O software CAM pode utilizar os projetos desenvolvidos pelo software CAD, para gerar caminhos de ferramentas, onde converte as montagens criadas pelo CAD (Autodesk, 2019). Para Martins (2005), o CAM segue as instruções de um computador, controlando a usinagem, velocidade e a rotação do eixo da árvore

A vantagem do software CAM está no fato de não haver necessidade de realizar dos cálculos da trajetória, transferindo esse trabalho para os recursos computacionais. (Sá Pinto, 2005). Para realizar o cálculo de trajetória da ferramenta, o usuário tem que fornecer ao sistema CAM uma faixa de tolerância, normalmente

determinada por uma tolerância superior e inferior (Helleno, 2004). A Fig. 4 apresenta um exemplo de trajetória da ferramenta.

Figura 4 - Trajetória da ferramenta em função da Tolerância CAM



Fonte: Adaptado do Luís Helleno, 2013.

A trajetória da ferramenta é ajustada dentro dessa faixa de tolerância, funcionando com um limite de variação. Essa faixa é conhecida como chord error (Andrade, 2012). Para Du (2017), o chord error tem como função auxiliar a precisão de usinagens, sendo empregado em sistemas de manufatura auxiliada por computador e de controle numérico.

A Fig. 4 mostra um exemplo de trajetória de ferramenta através de uma interpolação linear, representada pela linha verde por pontos cartesianos onde representam o início e o fim dos seguimentos de reta, a linha azul sendo o modelo geométrico e linha pontilhada a tolerância fornecida pelo usuário.

Os desvios geométricos na trajetória da ferramenta em relação a tolerância do sistema CAM, segundo Helleno (2013), abordado nos estudos de YEH e HSU (2002), como também Choi e Banerjee (2007), explica que a utilização da tolerância na programação do CAM, influencia a trajetória da ferramenta de usinagem, sendo um dos responsáveis pelo desvio entre a geométrica pelo sistema (CAD), e a geometria final da peça usinada.

2.3.1 Desvios Geométricas Provenientes da Programação CAM

O sistema CAM utiliza superfícies complexas gerados em um sistema CAD, onde geram programas CNC (Arias, 2009). Porém, essas plataformas podem acarretar desvios geométricos relacionados a fatores como a tolerância de cálculo para trajetória da ferramenta de corte e o tipo de interpolação adotada para o contorno de superfície (Ferreira, 2013).

2.4 TRANSFERÊNCIA DE DADOS DO CAD PARA O CAM

A transferência de dados entre o CAD e CAM pode ser realizada por meio de uma malha de triângulos geradas sobre uma geometria original do CAD e que aproxima-se da representação geométrica real através de uma tolerância definida pelo usuário. Este método, ocorre na maioria dos sistemas, mas nem todos eles ficam transparente ao usuário (Ferreira, 2013). Além da triangularização de superfícies as transferências de dados são feitas por meio de arquivos IGES, DXT entre outros, além da norma STEP (Schützer e Souza, 1999).

Segundo Henriques (2002), os softwares CAD/CAM de mesmo fabricante, apresentam o mesmo modelador geométrico. Desta forma, a transferência entre eles ocorre de forma direta, sem auxílio de interfaces normatizados. Mas os sistemas CAD/CAM de diferentes fabricantes acabam apresentando normalmente diferentes modelos geométricos, fazendo com que a transferência por esta interface gere diferentes falhas nas superfícies do produto.

2.5 METROLOGIA

A metrologia, ciência da medição e suas aplicações, engloba todos os aspectos teóricos e práticos da medição, qualquer que seja a incerteza de medição e o campo de aplicação, sendo aplicável a qualquer grandeza determinável (Guedes, 2014). A medição é um conjunto de operações que têm por objetivo determinar o valor de uma grandeza (Frota e Finkelstein, 2006).

Através da metrologia, foram avaliadas as medições das peças usinadas, verificando desvio dimensional e geométrico, por meio de sistemas de medição por coordenadas, comparando as medidas diretamente no modelo CAD.

2.5.1 Erro Dimensional e Geométrico e Medição por Coordenada

Erro dimensional é considerado o valor limite maior ou menor, especificado pela tolerância dimensional. Segundo Dória (2005), entende-se por tolerância dimensional a diferença entre as medidas máximas e mínimas admissíveis de uma

peça. O erro geométrico (erro de forma) é a diferença entre a superfície real obtida em relação a sua forma geométrica teórica (Pizzolato, 2019).

Os sistemas de medição por coordenadas (máquinas de medir por coordenadas) são utilizadas para medição de peças com geometria regulares e complexas. Esse sistema define a geometria de uma peça, por meio de pontos coordenados (x, y, z), localizados sobre a sua superfície a medir (Júnior, 2011).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão tratados os procedimentos experimentais realizados neste trabalho, na geração do desenho, código de usinagem, usinagem e medição.

3.1 Projeto em Software CAD

Para realização do desenho em Splines foi utilizado o CAD Inventor e SolidWorks®. Foram elaborados três modelos geométricos com curvas diferentes, representados nas Fig. 5 e Fig. 6.

Figura 5 – Modelos da peça em Splines, onde: a) perfil modelo 1; b) perfil modelo 2; c) perfil do modelo 3.

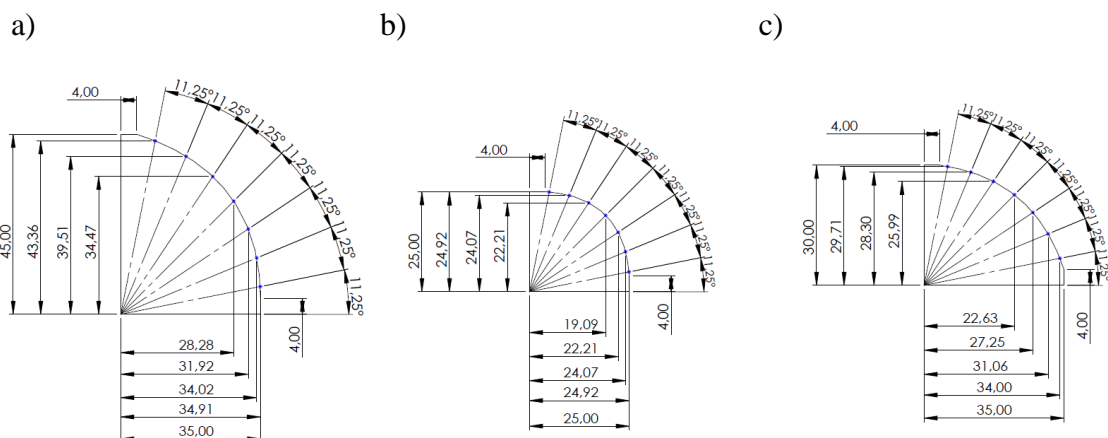
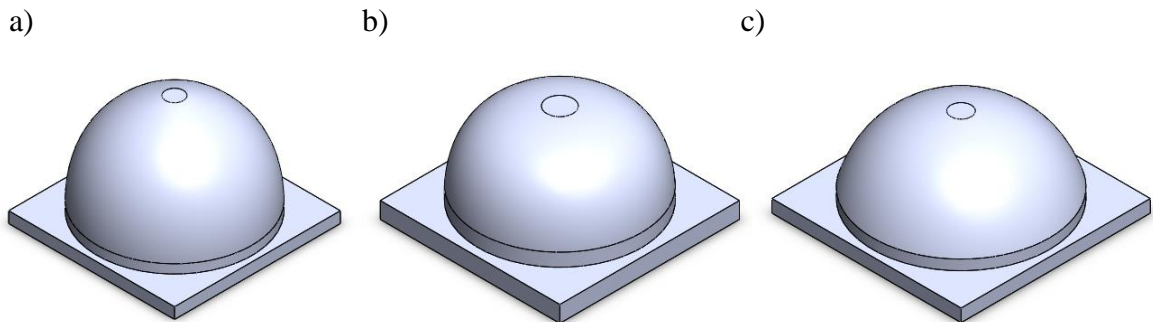


Figura 6 – Modelos da peça em Splines, onde: a) sólido do modelo 1, d) sólido do modelo 2 c) sólido do modelo 3.

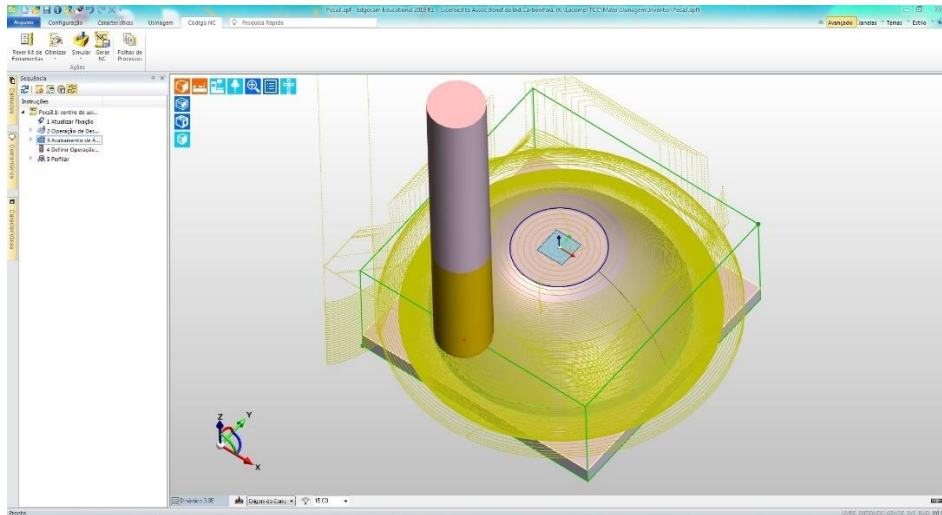


Fonte: Do Autor, 2020.

3.2 Programação CAM para Usinagem

Utilizou-se o software EdgeCam® para gerar os códigos CN, inserindo o arquivo do CAD sem conversão do arquivo para outro formato. A Fig. 7 mostra o perfil programado no software.

Figura 7 – Programação no software CAM – EdgeCAM®.



Fonte: Autor, 2020.

A estratégia de usinagem utilizada na programação do CAM realizou-se em duas etapas, desbaste e acabamento. O pós-processador utilizado foi desenvolvido pela empresa SKA para o centro de usinagem ROMI D600, com comando Fanuc.

3.2.1 Usinagem de Desbaste

O desbaste foi programado para utilizar uma fresa de topo Ø 25mm, a partir desta ferramenta, foi removido uma camada de material, com sobre metal de 1mm em X e Y, tendo como intuito trazer alívio o segundo desbaste. O corte foi programado para ser concordante, ou seja, a peça e a ferramenta se movem no mesmo sentido.

Na etapa de desbaste utilizou-se a estratégia *Waveform*, é uma técnica de usinagem de alta velocidade que mantém uma carga de corte constante da ferramenta, garantindo que o contato da ferramenta no material seja consistente (Edgecam®, 2018). O material utilizado na usinagem das peças, foi o alumínio 6063.

A Tab. 1 mostra os parâmetros programados no *software*, adotados para realização do desbaste do material.

Tabela 1: Parâmetros de corte para desbaste

Item	Parâmetros de corte	Operação desbaste	Unidade
01	Rotação por minuto (n)	3500	rpm
02	Avanço Linear (Vf)	450	mm/min
03	Número de facas (z)	5	Pçs
04	Avanço por minuto (F)	450	mm/min
05	Profundidade de corte (Ap)	1	mm

Fonte: Do Autor (2020)

Para determinar a velocidade de corte, foi utilizado a eq. 1 e para o cálculo de avanço por faca, a eq. 2.

$$Vc = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ [m/min]} \quad (1)$$

$$Vc = \frac{\pi \cdot 25 \cdot 3500}{1000} \text{ [m/min]}$$

$$Vc = 274,8 \text{ [m/min]}$$

$$fz = \frac{Vf}{z \cdot n} \text{ [mm/faca]} \quad (2)$$

$$fz = \frac{450}{5 \cdot 3500} \text{ [mm/faca]}$$

$$fz = 0,026 \text{ [mm/faca]}$$

Onde:

V_c = Velocidade de corte (m/min)

f_z = Cálculo de avanço por faca (mm/faca)

3.2.2 Usinagem de Acabamento

Depois da operação de desbaste, foi realizado o passe de acabamento em sentido concordante com fresa topo \varnothing 16mm e pastilha R300-0825e-KL de raio 4mm, da empresa Sandvik®.

A Tab. 2 mostra os parâmetros programados no *software*, adotados para realização do acabamento do material. O avanço por faca e a velocidade de corte foi calculada utilizando as equações 01 e 02.

Tabela 2: Parâmetros de corte para acabamento

Item	Parâmetros de corte	Operação acabamento	Unidade
01	Rotação por minuto (n)	4000	rpm
02	Velocidade de Corte (V_c)	201	m/min
03	Avanço por faca (f_z)	0,1	mm/faca
04	Avanço linear (V_f)	800	mm/min
05	Número de facas (z)	5	Pçs
06	Avanço por minuto (F)	800	mm/min
07	Profundidade de corte (A_p)	0,2	mm

Fonte: Do Autor (2020)

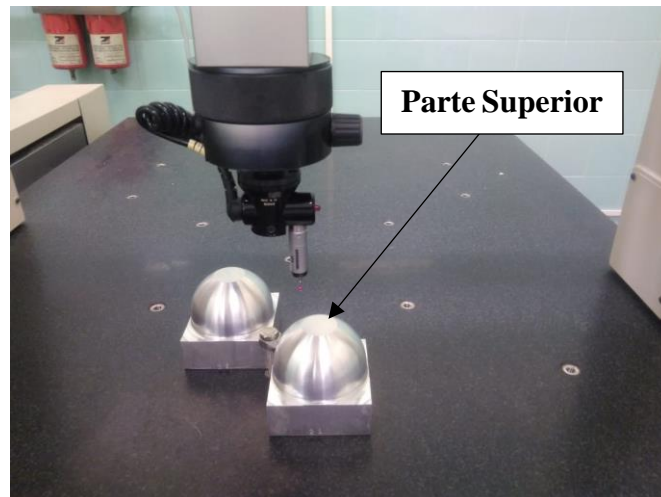
A estratégia de perfilamento das peças foi programada para ocorrer de forma helicoidal. As peças foram presas na morsa hidráulica da máquina, sempre na mesma posição para todas as peças. Durante o processo da usinagem, foi utilizado o fluido de corte lubri S1316, fluido sintético de base polímero.

3.3 Medição das Peças

As medições foram realizadas utilizando a mesa de medição por coordenadas Mitutoyo® BRT-M500, com programa Geopack 3. Para ter um ponto de referência para as medições das peças, a mesma fresa topo de \varnothing 16mm, foi utilizada

para usinar a parte superior, utilizando o comando de acabamento de áreas planas. A Fig. 9 mostra o modelo 1 na máquina de medição por coordenadas.

Figura 9 – Máquina de medição.



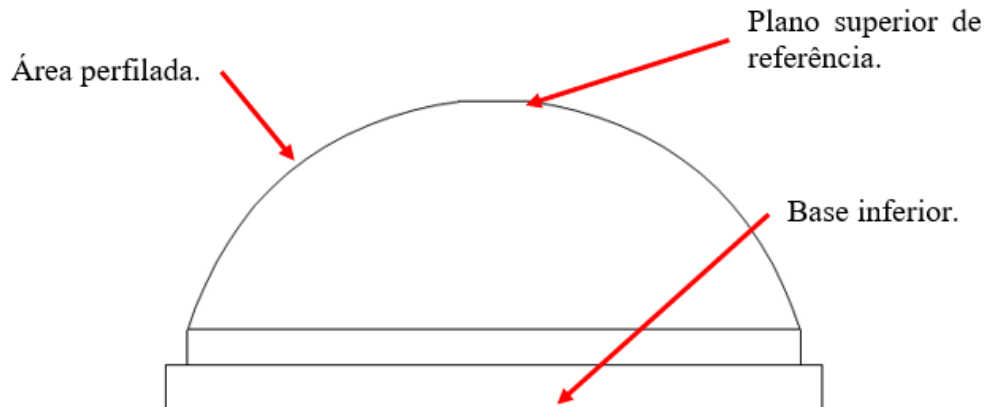
Fonte: Autor, 2020.

3.4 Procedimento de Medição

O procedimento de medição foi realizado da seguinte forma:

- 1) Plano de referência: Na parte superior de cada modelo foi usinado uma superfície de referência. Essa usinagem foi realizada em conjunto com o perfilamento da peça para garantir a perpendicularidade, para realizar as medições. Esta etapa se mostrou necessário, visto que o erro de paralelismo entre a base inferior das peças usinadas e o plano superior, medido pelo equipamento, variou entre 6 e 33 minutos de inclinação. Com a criação do plano, o valor zero do eixo z da máquina de medição, passou a ser o plano superior de referência. A Fig. 10 mostra o perfil do modelo 3.

Figura 10 – Peça em perfil, mostrando os principais planos de referência para medição.

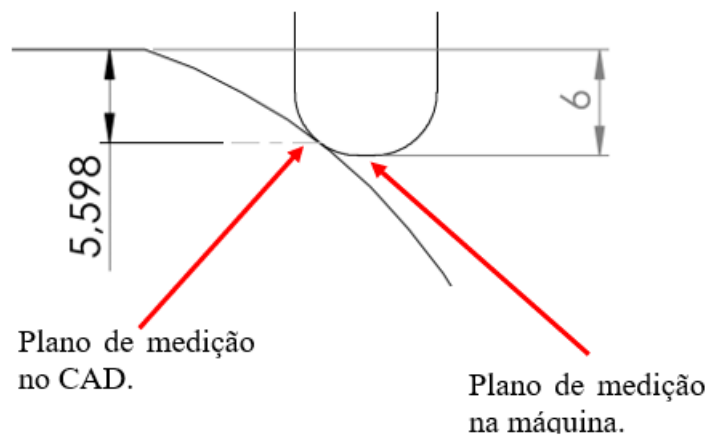


Fonte: Autor, 2020.

- 2) Medição do diâmetro por plano de medição: A partir do plano de referência, foi determinado um plano de medição de z-2 mm, travando o posicionamento de medição na máquina. A cada plano de medição, cinco pontos de medição foram feitos na circunferência, eixos x e y da máquina. O software Geopak da máquina de medição calculava o diâmetro da peça. À medida que a ponteira de medição se movimentava nos eixos x e y, o eixo z definia um novo plano de medição, compensando a inclinação do plano de referência, mantendo o plano de medição perpendicular à superfície perfilada. Esse procedimento foi repetido a cada 2 mm em z até: z-30 mm para o modelo de peça 1, z-20 mm para o modelo 2 e z-24 mm para o modelo 3.
- 3) Determinar o plano de medição no software CAD: Pelas características geométricas e de equipamento de medição, o plano de medição da máquina que foi utilizado como referência, não pode ser usado para determinar a altura de medição no software CAD, isto é, o plano de medição z-6 mm da máquina de medição não é o z-6 mm do CAD, a partir do mesmo plano de referência. Isso ocorre dado que a leitura do plano de medição é realizada pela parte inferior da ponteira de medição e a medida da circunferência é realizada quando o apalpador da máquina toca a peça, sendo o ideal tocar na parte inferior do apalpador, respeitando a leitura do plano de medição, para comparar com o CAD, porém como representado na Fig. 11, mostra a diferença entre os planos de referência e a medição dos diâmetros. O apalpador não toca a peça na parte inferior, toca na

lateral em tangente, mudando a cada plano de medição. Por este motivo foi feito um procedimento de correção em todos os planos de medição dos três modelos de peças medidos.

Figura 11 – Diferença dos planos de medições entre CAD e a máquina de medição por coordenadas.



Fonte: Autor, 2020.

- 4) Determinar o diâmetro teórico no software CAD: Para determinar o diâmetro teórico no CAD, foi criado um plano de corte na peça e a altura de corte seguiu a altura corrigida do plano de medição. Usando a ferramenta de medida no software CAD, foi possível determinar o diâmetro teórico do desenho e comparar com o diâmetro medido na peça.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta etapa serão apresentados os resultados obtidos nos procedimentos usinagem, comparado com os valores nos softwares 3D.

4.1 Medições dos Modelos Usinados.

A medição se deu por meio de leituras pontuais, em planos de medição. A leitura dos pontos teve como referência a base plana superior da peça. Por meio desta referência os planos de medição foram alterados até a base da peça. Cada plano de medição, a altura definiu o valor do diâmetro, conforme demonstrado nas Tab. 3, 4 e 5.

Tabela 3 – Medições das Peças Usinadas para o Modelo 1 dos softwares CAD.

Modelo 1 - SolidWorks®				Modelo 1 - Inventor®			
Altura (mm)	Peça 01 Diâmetro (mm)	Peça 02 Diâmetro (mm)	Desvio médio (mm)	Altura (mm)	Peça 03 Diâmetro (mm)	Peça 04 Diâmetro (mm)	Desvio médio (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
1,680	31,685	31,781	0,048	1,680	31,037	30,413	0,312
3,610	37,567	37,622	0,027	3,610	36,856	36,531	0,163
5,540	42,552	42,609	0,029	5,540	42,024	41,745	0,140
7,496	46,819	46,895	0,038	7,496	46,187	46,193	0,003
9,413	50,539	50,574	0,017	9,413	49,923	50,116	0,096
11,236	53,770	53,786	0,008	11,236	53,275	53,544	0,134
13,134	56,541	56,584	0,022	13,134	56,336	56,473	0,069
15,044	58,972	59,000	0,014	15,044	58,934	59,069	0,068
16,980	61,062	61,094	0,016	16,98	61,235	61,293	0,029
18,903	62,899	62,918	0,009	18,903	63,183	63,226	0,021
20,827	64,461	64,467	0,003	20,827	65,038	64,875	0,081
22,791	65,786	65,813	0,014	22,791	66,418	66,267	0,076
24,628	66,915	66,929	0,007	24,628	67,438	67,390	0,024
26,615	67,848	67,861	0,007	26,615	68,354	68,322	0,016
28,503	68,607	68,614	0,004	28,503	69,038	69,002	0,018

Fonte: Do Autor (2020)

Tabela 4 – Medições das Peças Usinadas para o Modelo 2 dos softwares CAD.

Modelo 2 - SolidWorks®				Modelo 2 - Inventor®			
Altura (mm)	Peça 05 Diâmetro (mm)	Peça 06 Diâmetro (mm)	Desvio médio (mm)	Altura (mm)	Peça 07 Diâmetro (mm)	Peça 08 Diâmetro (mm)	Desvio médio (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
1,691	31,200	31,114	0,043	1,691	31,160	31,053	0,053
3,549	36,270	36,220	0,025	3,549	36,253	36,169	0,042
5,362	39,983	39,984	0,001	5,362	39,931	39,911	0,010
7,172	42,783	42,766	0,009	7,172	42,757	42,732	0,012
9,022	44,942	44,950	0,004	9,022	44,964	44,940	0,012
10,857	46,615	46,604	0,006	10,857	46,665	46,619	0,023
12,754	47,908	47,907	0,001	12,754	47,930	47,902	0,014
14,600	48,885	48,869	0,008	14,600	48,836	48,860	0,012
16,454	49,568	49,560	0,004	16,454	49,509	49,504	0,003
18,411	50,015	49,994	0,011	18,411	50,015	49,999	0,008

Fonte: Do Autor (2020)

Tabela 5 – Medições das Peças Usinadas para o Modelo 3 dos softwares CAD.

Modelo 3 - SolidWorks				Modelo 3 - Inventor			
Altura (mm)	Peça 09 Diâmetro (mm)	Peça 10 Diâmetro (mm)	Desvio médio (mm)	Altura (mm)	Peça 11 Diâmetro (mm)	Peça 12 Diâmetro (mm)	Desvio médio (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
1,826	31,871	31,916	0,023	1,826	32,356	32,387	0,015
3,738	38,890	38,942	0,026	3,738	39,075	39,809	0,367
5,598	44,463	44,521	0,029	5,598	44,456	44,525	0,034
7,530	49,016	49,049	0,017	7,530	48,882	48,980	0,049
9,409	52,906	52,909	0,002	9,409	52,679	52,727	0,024
11,304	56,240	56,227	0,007	11,304	55,956	56,011	0,027
13,187	59,094	59,112	0,009	13,187	58,832	58,868	0,018
15,114	61,625	61,613	0,006	15,114	61,343	61,385	0,021
17,028	63,829	63,818	0,006	17,028	63,549	63,592	0,021
18,958	65,769	65,785	0,008	18,958	65,566	65,590	0,012
20,697	67,492	67,517	0,012	20,697	67,302	67,404	0,051
22,801	69,016	69,027	0,005	22,801	69,008	69,039	0,016

Fonte: Do Autor (2020)

Para cada modelo, foi usinado duas peças, sendo que através delas foi calculado o desvio médio. O desvio médio é uma medida de dispersão que tem como objetivo mostrar a distância dos valores em torno da sua média, indicando um grau de precisão (Cavalcante, 2020).

Para melhor compressão deste desvio, analisando o modelo 03 do SolidWorks®, utilizando a altura 1,826mm. A peça 09 tem um diâmetro de 31,871mm e a peça 10 tem um diâmetro de 31,916mm. Calculando a média entre os dois valores, se tem um diâmetro médio de 31,894mm, ou seja, o desvio médio de 0,023mm.

4.2 Comparação entre o Modelo Geométrico CAD e Modelo Usinado

Utilizando a mesma altura de plano de medição, foi analisado os valores no software CAD e nas peças usinadas. As Tab. 6, 7 e 8 mostram a comparação entre as peças projetada (CAD) e a média usinada entre as duas peças de cada modelo.

Tabela 6 – Comparação das medições CAD e CNC para o Modelo 1.

Modelo 1 - SolidWorks®				Modelo 1 - Inventor®			
Altura (mm)	Média Usinada Diâmetro (mm)	Medida CAD (mm)	Variação (mm)	Altura (mm)	Média Usinada Diâmetro (mm)	Medida CAD (mm)	Variação (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
1,680	31,733	31,85	-0,115	1,680	30,725	31,85	-1,123
3,610	37,595	37,71	-0,118	3,610	36,694	37,71	-1,019
5,540	42,581	42,69	-0,111	5,540	41,885	42,69	-0,807
7,496	46,857	46,96	-0,107	7,496	46,190	46,96	-0,774
9,413	50,557	50,65	-0,092	9,413	50,020	50,65	-0,629
11,236	53,778	53,85	-0,072	11,236	53,410	53,85	-0,441
13,134	56,563	56,63	-0,068	13,134	56,405	56,63	-0,226
15,044	58,986	59,04	-0,058	15,044	59,002	59,04	-0,042
16,980	61,078	61,14	-0,058	16,980	61,264	61,14	0,128
18,903	62,909	62,94	-0,033	18,903	63,205	62,94	0,262
20,827	64,464	64,49	-0,024	20,827	64,957	64,49	0,469
22,791	65,800	65,82	-0,017	22,791	66,343	65,82	0,526
24,628	66,922	66,92	0,000	24,628	67,414	66,92	0,492
26,615	67,855	67,83	0,023	26,615	68,338	67,83	0,506
28,503	68,611	68,56	0,047	28,503	69,020	68,56	0,456
Média			-0,054	Média			-0,148

Fonte: Do Autor (2020)

Tabela 7 – Comparação das medições CAD e CNC (Modelo 2).

Modelo 2 - SolidWorks®				Modelo 2 - Inventor®			
Altura (mm)	Média Usinada Diâmetro (mm)	Medida CAD (mm)	Variação (mm)	Altura (mm)	Média Usinada Diâmetro (mm)	Medida CAD (mm)	Variação (mm)
0	0	0	0	0	0	0,00	0
1,691	31,157	31,31	-0,155	1,691	31,107	31,31	-0,206
3,549	36,245	36,27	-0,027	3,549	36,211	36,27	-0,061
5,362	39,984	39,95	0,032	5,362	39,921	39,95	-0,031
7,172	42,775	42,75	0,021	7,172	42,745	42,75	-0,009
9,022	44,946	44,91	0,032	9,022	44,952	44,91	0,038
10,857	46,610	46,57	0,037	10,857	46,642	46,57	0,070
12,754	47,908	47,85	0,062	12,754	47,916	47,85	0,070
14,600	48,877	48,79	0,091	14,600	48,848	48,79	0,062
16,454	49,564	49,46	0,104	16,454	49,507	49,46	0,047
18,411	50,005	49,89	0,112	18,411	50,007	49,89	0,115
Média			0,031	Média			0,009

Fonte: Do Autor (2020)

Tabela 8 – Comparação das medições CAD e CNC (Modelo 3).

Modelo 3 - SolidWorks®				Modelo 3 - Inventor®			
Altura (mm)	Média Usinada Diâmetro (mm)	Medida CAD (mm)	Variação (mm)	Altura (mm)	Média Usinada Diâmetro (mm)	Medida CAD (mm)	Variação (mm)
0	0	0,00	0,000	0	0	0,00	0,000
1,826	31,894	32,12	-0,225	1,826	32,372	32,12	0,253
3,738	38,916	39,07	-0,152	3,738	39,442	39,07	0,374
5,598	44,492	44,54	-0,046	5,598	44,491	44,54	-0,047
7,530	49,033	49,14	-0,104	7,530	48,931	49,14	-0,205
9,409	52,908	53,07	-0,166	9,409	52,703	53,07	-0,371
11,304	56,234	56,36	-0,123	11,304	55,984	56,36	-0,372
13,187	59,103	59,20	-0,095	13,187	58,850	59,20	-0,348
15,114	61,619	61,65	-0,035	15,114	61,364	61,65	-0,290
17,028	63,824	63,91	-0,083	17,028	63,571	63,91	-0,336
18,958	65,777	65,76	0,015	18,958	65,578	65,76	-0,184
20,697	67,505	67,55	-0,041	20,697	67,353	67,55	-0,193
22,801	69,022	69,06	-0,038	22,801	69,024	69,06	-0,037
Média			-0,091	Média			-0,146

Fonte: Do Autor (2020)

Observando os dados de desvio apresentado na Tab. 6, 7 e 8, as peças usinadas apresentaram diferenças nos seus valores geométricos. Apresentando maior diferença na parte inicial das peças em relação a final. Pelo que se pode observar, o perfil mais na vertical tendeu a ter maior precisão de usinagem, se for observar as Fig. 12, Fig. 13 e Fig. 14 abaixo, o modelo 02 foi o que apresentou melhor resultado, devido a este fator.

Comparando as médias de diferença entre o modelo 01, 02, 03, o pior caso encontrado foi o modelo 03, por ter a maior inclinação. Observando a Tab. 9, pode se observar a diferença entre os valores, comprovando que o modelo 03 apresentou o pior resultado.

Tabela 9 – Comparação entre modelos.

Comparações entre modelos		
Modelos	Média	Média entre os modelos
Mod. 01 - SoldWorks	-0,054	-0,101
Mod. 01 - Inventor	-0,148	
Mod. 02 - SoldWorks	0,031	0,020
Mod. 02 - Inventor	0,009	
Mod. 03 - SoldWorks	-0,091	-0,119
Mod. 03 - Inventor	-0,146	

Diferença entre o modelo 03 e 01, comparando entre as medias dos modelos, apresentados na terceira coluna

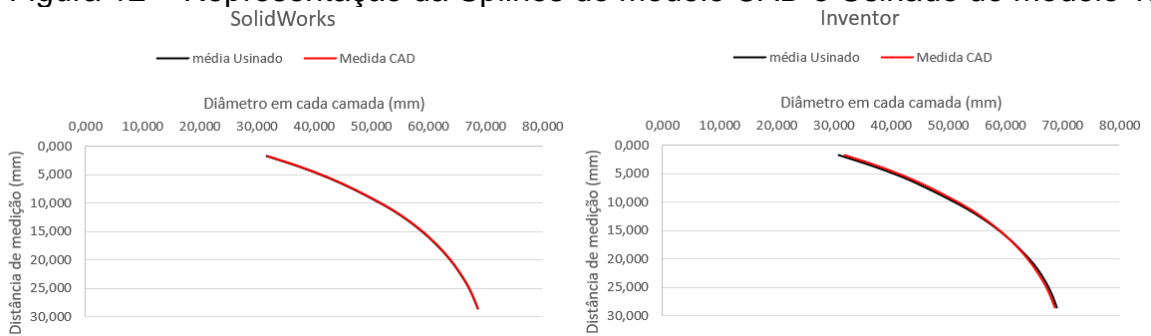
15%

Diferença entre o modelo 03 e 02, comparando entre as medias dos modelos, apresentados na terceira coluna

83%

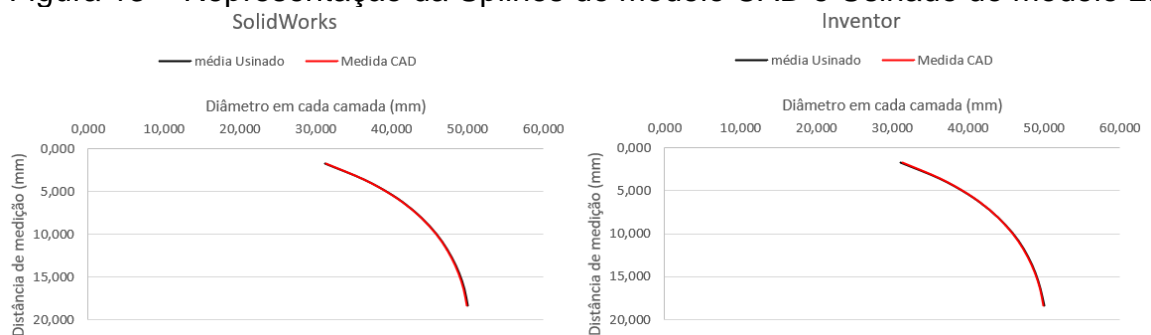
Fonte: Do Autor (2020)

Figura 12 – Representação da Splines do modelo CAD e Usinado do modelo 1.



Fonte: Do Autor (2020)

Figura 13 – Representação da Splines do modelo CAD e Usinado do modelo 2.



Fonte: Do Autor (2020)

Figura 14 – Representação da Splines do modelo CAD e Usinado do modelo 3.



Fonte: Do Autor (2020)

Através da Fig. 12, 13 e 14, informa a diferença entre o perfil teórico desenhado e o perfil usinado nos modelos. Comparando os softwares de CAD com o usinado, a diferença entre os programas existe. Mesmo sendo em uma pequena magnitude, a erros dimensionais e geométricos nas peças.

Os erros dimensionais foram causados pelas diferenças entre valores de diâmetros dos modelos usinados e teóricos, principalmente no início da base superior, como mostra os dados apresentados na Tab. 6, 7 e 8. Os erros geométricos, analisando a inclinação da curva, as Fig. 12, 13 e 14, a média usinada tem uma diferença na sua curva geométrica em comparação com o CAD. Essas análises, referentes a esses erros em uma peça que exige precisão, é levado em consideração uma faixa de tolerância de tolerância programada no sistema CAM, sendo de 0,01mm e comparando com os desvios.

Nestas diferenças estão englobados os erros computacionais de softwares, precisão do equipamento de usinagem, precisão do equipamento de medição e erros provenientes da ferramenta de usinagem, como desgastes e batimento da ferramenta. Mesmo que, a cada usinagem a face de corte da pastilha fosse alterada para evitar erros por desgaste de ferramenta, ao se retirar e colocar o porta-pinça na máquina ocasiona um erro de batimento na ferramenta.

Mesmo com todas essas possibilidades de erros, a que mais impactou no erro geométrico final das peças foi o perfil em Spline. Se o maior erro fosse gerado por outra fonte, o desvio médio a cada plano de medição seria muito próximo, mas isso não ocorreu. Isso se observa no modelo 3 usinado a partir da peça gerada no software Inventor com desvio no plano de medição z-2 mm de 0,253 mm e no plano

z-24 mm desvio de 0,037 mm. Apesar de um desvio considerável, no último plano de medição, ele é aproximadamente 684% menor que no plano inicial de medição.

No software CAM não foi utilizado nenhum comando de compensação pelo fato de usar uma construção em Spline. A única compensação utilizada foi a medição da ferramenta (conjunto porta pinça hidráulico, ferramenta e pastilha) e seu batimento realizado na empresa ICON S.A. O valor de medição do diâmetro usinado programado no software CAM. Esse procedimento foi usado para mitigar uma grande fonte de erro que é a montagem da ferramenta.

5. CONCLUSÃO

A utilização de Splines na construção do desenho em CAD 3D para geometrias complexas é uma solução de construção, mas pode ser uma fonte de erros, dependendo do processo de fabricação desta peça e da sua precisão. Essa fonte de erro se mostrou relevante quando aplicado ao processo de usinagem CNC, através da geração da programação de usinagem utilizando software de CAM.

As medições das peças usinadas indicam que ao construir uma peça no CAD 3D utilizando o Spline, existe um impacto significativo na geometria final da peça usinada, com os experimentos demonstrando que variando o perfil da Spline, variam os erros geométricos e dimensionais.

Esta variação geométrica e dimensional encontrada nos experimentos indicam que a utilização de Spline como método de construção é o principal fator de geração de erros, comprovado com os resultados obtidos.

Neste trabalho foram utilizados softwares de CAD e CAM de diferentes fabricantes. Erros provocados por diferença de arquitetura construtiva de softwares já são conhecidos e foram pesquisados por outros autores. Avaliando a diferença entre a média da variação entre os modelos, quando se tem uma maior inclinação o SolidWorks® se sai melhor que o Inventor. No modelo 1, o Inventor foi 274% pior. No modelo 3, o Inventor foi 160% pior. Porém, quando a peça é mais na vertical, o inventor se destaca, onde o SolidWorks® foi 344% pior. Talvez essa diferença esteja relacionado com as diferenças de arquitetura de construção destes softwares, mas isso não pode ser comprovado neste experimento, necessitando de novos trabalhos que estudem especificamente esta diferença e o impacto sobre a geometria da peça.

Como sugestão para trabalho futuros, propôs se testar a geometria por Spline com outras extensões de arquivos, para avaliar a diferença entre a peça teórica e a usinada. Outro trabalho seria testar as transferências de dados entre softwares da mesma fabricante, para avaliar a interferência nas geometrias complexas.

Agradecimentos

Agradeço ao professor Alexandre Milanez pela dedicação, paciência e por estar sempre me incentivando, à minha família e aos meus colegas, que sempre me apoiaram e a faculdade SATC, por disponibilizar todos os recursos necessários para o desenvolvimento do trabalho.

6. BIBLIOGRAFIA

ARIAS, M. L. (2009). Análise do Comportamento de Diferentes Sistemas CAM na Usinagem de Superfícies Complexas Utilizando Altas Velocidades. Dissertação de Mestrado. Joinville, SC, SOCIESC.

AUTODESK. Splines. Disponível em: <knowledge.autodesk.com/pt-br/support/autocad/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/PTB/AutoCAD-Core/files/GUID-58316136-30EB-499C-ACAD-31D0C653B2B2-htm.html>. Acesso em: 15 de abril de 2020.

AUTODESK. Software CAD 3D e de projeto mecânico. Disponível em: <<https://www.autodesk.com.br/products/inventor/features>>. Acesso em: 30 abr. 2019

BARBARINI, L. H. M.; Síntese de Cascos de Embarcações Através de Métodos de Otimização Aplicados a Curvas B-spline. 2007. 142 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecatrônica - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo.

CAD/CAM Projeto e fabricação assistidos por Computador. Disponível em: <<https://www.autodesk.com.br/solutions/cad-cam>>. Acesso em: 18 abr. 2019.

CAVALCANTE. Desvio Médio. 2020. Disponível em: <cavalcanteassociados.com.br/article.php?id=12>. Acesso em: 15 de abril de 2020.

CHOI, Y. K.; BANERJEE, A. Tool path generation and tolerance analysis for free-form surfaces. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 47, p. 689-696, 2007.

CHÜTZER, K. SOUZA, N. A. L Utilização das Normas Step nos Sistemas CAD/CAM para Integração entre Fornecedores do Setor Automotivo. São Paulo. 1999.

DÓRIA, M. A. T. Análise da Influência da Rigidez do Sistema nos Erros Dimensionais e Geométricos no Processo de Torneamento. Dissertação. São Paulo. 2005.

DU, X. et al. Third-order Chord Error Estimation For Freeform Contour in Computer-aided Manufacturing and Computer Numerical Control Systems. 2017.

EDGE CAM. Maior controle de Entrada em Waveform. 2018. Disponível em: <edgecam.com.br/docs/knowledge-base/maior-controle-de-entrada-em-waveform/>. Acesso em: 17 de julho de 2020.

FERREIRA, A. M. Estudo dos Erros de Forma no Fresamento de Geometrias Complexas, Joinville. 2013.

FROTA, M. N. FINKELSTEIN, L. Educação em Metrologia e Instrumentação: Demanda Qualificada no Ensino das Engenharias. Lisboa. 2006.

GALLAHER, M. P, O'CONNOR, A. C., PHELPS, T. (2002): Economic Impact Assessment of the International Standard for the Exchange of Product Model Data (STEP) in Transportation Equipment Industry. NIST, USA.

GUEDES, D. E. Análise Metrológica de Acabamento de Superfícies Aplicada a Componentes Mecânicos. Dissertação de Mestrado. Lisboa. 2014

HELLENO, A. L. et al. Análise do efeito da tolerância de suavização da interpolação spline na manufatura de superfícies complexas, 2013.

HELLENO, A. L. Investigação de Métodos de Interpolação Para Trajetória da Ferramenta na Usinagem de Moldes e Matrizes Com Altas Velocidades. Dissertação (Mestrado Engenharia de Produção) - Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP. Santa Bárbara d'Oeste - SP, p. 140. 2004.

HENRIQUES J. (2002). Intercâmbio de dados no desenvolvimento do produto. Engenharia automotiva e aeroespacial, São Paulo, v3. N11. p26-36.

HENRIQUES, J. R. (2004). Contribuição para a Otimização da Troca de Dados Geométricos entre Sistemas CAD Utilizando Processadores STEP AP214. Dissertação de Mestrado. Santa Bárbara D' Oeste: UNIMEP.

HOLTZ, M. L.; (2009). Estudo sobre a Transferência de Informações Geométricas entre Sistemas CAD CAM. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Instituto Superior Tupy, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. p.22.

HSU, L.; YEH, S. S. Adaptive federate interpolation for parametric curves with a confined chord error. Computer Aided Design, v. 34, p. 229-237, 2002.

JÚNIOR, L. S. et al. Uma proposta para garantia da qualidade metrológica em peças de geometria complexa. Ceára. 2011.

KATSUKI, A. et al. Design of Mechanical Actuator in 3D CAD Software, 2013.

MARTINS, P. G.; LAUGENI, F. P. Administração da produção. 2 ed. São Paulo: Saraiva, 2005. 556 p.

MECANICA INDUSTRIAL. O que é Usinagem. 2020. Disponível em: <www.mecanicaindustrial.com.br/420-o-que-e-usinagem/>. Acesso em: 15 de abril de 2020.

PEREIRA, L. R. CARVALHO, J. C. M. Método de Ajuste de Curvas Usando B-spline com Peso. Minas Gerais. 2014.

PIZZOLATO. Morgana Tolerâncias. disponível em: <www.ufsm.br>. Acesso em: 01 maio. 2019.

RODRIGUES, A. Estudo da Relação Entre as Principais Estratégias de Fresamento de Cavidades na Usinagem de Moldes Termoplásticos. Piracicaba. 2012.

SÁ PINTO, F. B. de. RIBEIRO, R. A. da. C. Estudo de Reengenharia de Sistema Produtivo Integrado para Fins Educacionais - Conceitos Gerais de CAD/CAM/CAE/CIM: manual de orientação. Porto, 2005. 25 p.

SILVA, L. K. M. Um Sistema de Modelagem Geométrica Usando Splines. Disponível em: <www2.sbc.org.br/csbc2000/pdf/ctic/ctic007.pdf>. Acesso em: 08 abr. 2020.

SOUZA, A. F. de. ULBRICH, C. B. L. Engenharia integrada por computador e sistemas CAD/CAM/CNC: princípios e aplicações. São Paulo: Artliber, 2009. 332 p.

SOLIDWORKS. Splines. Disponível em: <help.solidworks.com/2018/portuguese-brazilian/SolidWorks/sldworks/c_splines.htm/>. Acesso em: 15 de abril de 2020.

SPECK, H. J. Proposta de método para facilitar a mudança das técnicas de projetos: da prancheta à modelagem sólida (cad) para empresas de engenharia de pequeno e médio porte. Florianópolis. 2005.

UTPOTT, N. M. Regressão Logística utilizando b-splines: uma maneira de lidar com relações não lineares. Porto Alegre. 2015

ZOZ, J. Estudo de Métodos e Algoritmos de Splines, Bezier, Casteljaou e B-spline. Blumenau. 1999.