

## **Relatório final de pesquisa – Parceiro Indústria TGM WEG**

### **Projeto DMECAS: Desenvolvimento, fabricação e avaliação de superfícies Classe A**

#### **Apoio:**

Jean Rodrigues da Silva  
Empresa TGM WEG Energia

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPQ

#### **Coordenação:**

Prof. Dr. Adriano Fagali de Souza

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC

Grupo de Pesquisa em Manufatura Auxiliada por Computador - GPCAM

#### **Pesquisadores:**

Guilherme André Werlang

Hingrid da Rosa dos Santos

MSc. Igor Andrade

Florianópolis, março de 2024

## **RESUMO**

Este relatório apresenta os resultados obtidos com as pesquisas realizadas para identificar a influência do nível de continuidade de superfícies modeladas no CAD (Superfícies Classe A) em peças funcionais. Com o apoio da empresa TGM WEG empregou-se na pesquisa a geometria de uma palheta usada em turbina de geração de energia. Como resultado geral, observou-se que a geometria CAD 3D, empregada pela empresa para a fabricação deste componente da turbina, apresentava descontinuidade geométrica na superfície. No laboratório GPCAM/UFSC a geometria foi re-modelada para obter maior nível de continuidade (superfície Classe A). A geometria original e duas geometrias remodeladas foram usinadas em máquina CNC. As peças fabricadas em aço inoxidável foram avaliadas em uma cabine de luz, a fim de identificar possíveis descontinuidades superficiais. Os resultados mostram que a descontinuidade, visível na superfície CAD, não pode ser identificada na peça usinada. Este fato provavelmente ocorre, pois, a geração de programas CNC faz o uso da interpolação de pequenos segmentos de retas (comando G01) para descrever as trajetórias complexas da ferramenta de corte.

**Palavras-chave:** superfícies classe A, continuidade geométrica, fresamento.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	4
2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	4
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	6
3.1 Análise dos modelos CAD .....	6
3.2 Análise de reflexão .....	8
4. CONCLUSÃO.....	13
5. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....	14

## 1. INTRODUÇÃO

Superfície classe A é um termo frequentemente usado na indústria automotiva para se referir a superfícies de elevada qualidade, normalmente com associação específica à qualidade estética visual. Nas peças externas dos carros, esta qualidade visual é comumente avaliada pela observação da reflexão de fontes de luz, e imperfeições são notadas por meio das distorções que estas geram (Fernholz, 2013). Para garantir boa reflexão, normalmente se adotam requisitos de suavidade de curvatura.

O nível de suavidade de uma superfície modelada no CAD está relacionado com o nível de continuidade matemática na união de curvas ou superfícies 3D. O nível de continuidade pode ser entendido intuitivamente como o nível de qualidade da conexão entre essas entidades matemáticas. É identificado pela letra G, seguida de um número, sendo que números maiores denotam maior nível de continuidade (Souza e Ulbrich, 2013). Os níveis de continuidade geométrica mais adotados na modelagem CAD vão de  $G^0$  a  $G^3$ , e superfícies classe A são comumente definidas como sendo superfícies de continuidade  $G^2$  ou superior.

Além da utilidade estética as superfícies classe A podem ser demandadas na indústria por características funcionais. Isto ocorre em especial nos produtos que lidam com escoamentos de fluidos, onde a qualidade superficial (que tem como importante parâmetro a continuidade geométrica) impacta a performance. Por conta deste impacto, é evidente que os aspectos geométricos tanto da peça projetada quanto da peça fabricada são importantes. Dentro deste contexto, o presente trabalho estuda a relação entre o nível de continuidade geométrica do modelo CAD e a suavidade obtida na peça fabricada, através de um estudo de caso. O caso estudado foi o de uma palheta de turbina da empresa WEG.

## 2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Inicialmente foi recebida a geometria de um corpo-de-prova fornecido pela empresa TGM WEG, onde a região central representa uma palheta de turbina (apenas a região central foi considerada no estudo). A geometria pode ser vista na Fig. (1).

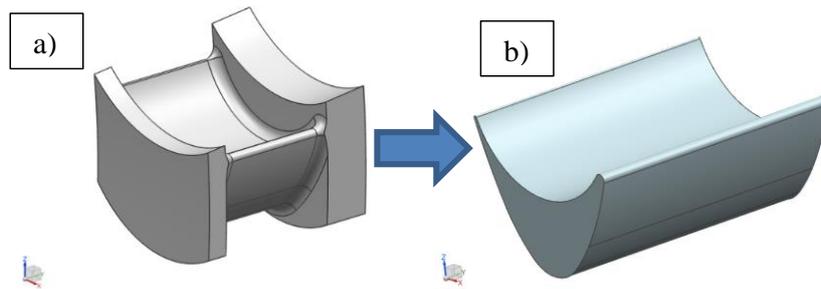


Figura 1 - (a) geometria fornecida pela empresa WEG; (b) geometria trabalhada no artigo

Analisando o perfil da pá, que tem seção transversal constante (geometria  $2 \frac{1}{2} D$ ), foi constatado que o mesmo é delimitado por curvas de continuidade  $G^1$ . Partindo disso, o presente estudo propõe-se a fazer modificações nas curvas que formam o perfil da peça de modo a obter novas geometrias, uma com continuidade  $G^2$  e outra com continuidade  $G^3$ . Os efeitos desta alteração nas peças usinadas são o foco do estudo.

Com as 3 geometrias, as peças foram fabricadas em aço Inox em um centro de usinagem Romi D600. Foi utilizada uma fresa de metal duro de topo reto com diâmetro 10 mm, de 4 arestas. Para as 3 geometrias, foram geradas trajetórias de usinagem pelo padrão de corte profile do software NX 9 Siemens®. Os parâmetros utilizados para o acabamento foram: tolerância da trajetória CAM 0,005 mm, avanço por aresta ( $f_z$ ) 0,1 mm, profundidade de corte axial ( $a_p$ ) 22 mm (igual ao comprimento da peça), profundidade de corte radial ( $a_e$ ) 0,2 mm, velocidade de corte ( $v_c$ ) 60 m/min.

Ao longo do trabalho, foram conduzidas 2 análises: modelos CAD, apresentando o desvio geométrico das novas geometrias em relação à original, além dos pentes de curvatura (ferramenta CAD para identificar a continuidade); e uma inspeção de reflexão de luz, trazendo uma análise comparativa da continuidade aparente das geometrias, tanto pela ferramenta de reflexão fornecida pelo software CAD quanto por um ensaio conduzido nas peças fabricadas.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Análise dos modelos CAD

A determinação do nível de continuidade foi feita com auxílio de uma ferramenta gráfica, presente em softwares CAD, chamada pente de curvatura. O pente de curvatura consiste em uma plotagem, nas curvas a serem avaliadas, de segmentos de reta com origem em pontos discretos das curvas. Pela extremidade oposta dos segmentos passa uma curva adicional. Cada segmento é orientado na direção da normal da curva no respectivo ponto e tem comprimento proporcional ao valor da curvatura. Como forma de ilustração, a Fig. (2) traz uma comparação lado a lado de pentes de curvatura, de continuidades  $G^1$  a  $G^3$ .

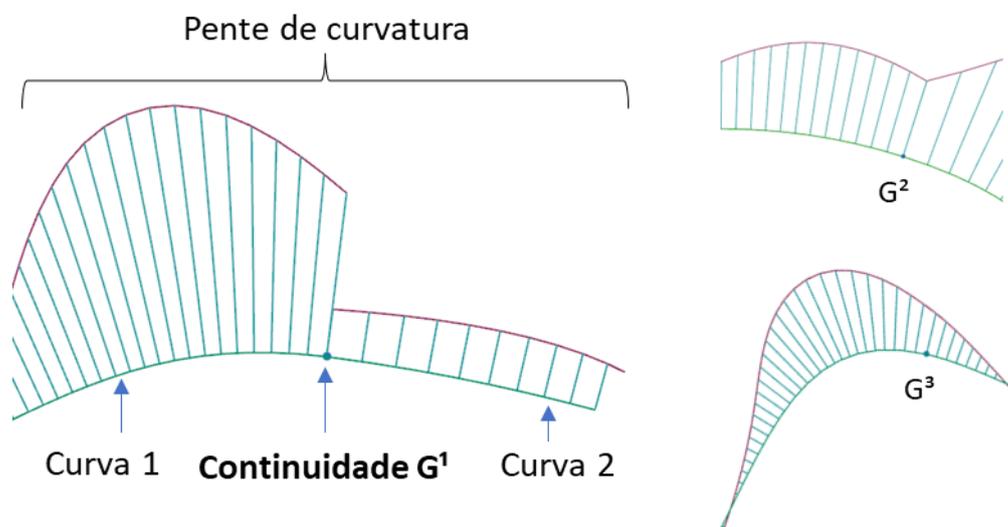


Figura 2 – Comparação de pentes de curvatura  $G^1$  a  $G^3$

Na Fig. (3) é apresentado o pente de curvatura da geometria de continuidade  $G^1$  (original). Nota-se um alinhamento da direção dos segmentos de reta nos pontos de união das curvas, indicando nível  $G^1$  de continuidade.

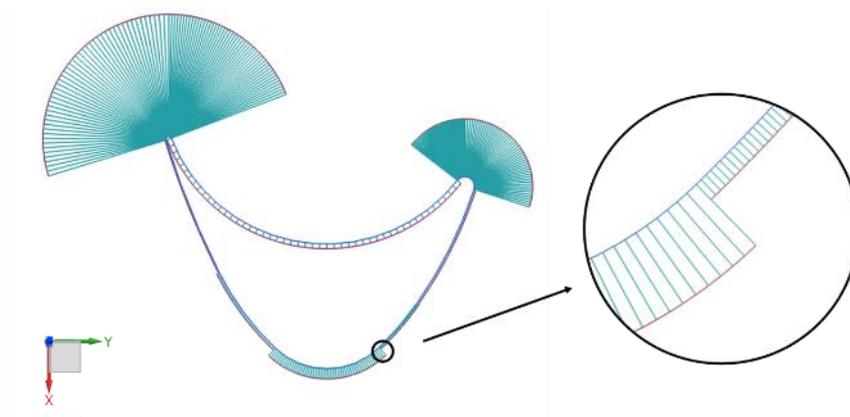


Figura 3 – Pente de curvatura da peça  $G^1$  (original)

A geometria de continuidade  $G^2$  foi gerada de modo que o maior desvio geométrico em relação à peça original é de 0,17 mm. O pente de curvatura e o desvio geométrico podem ser vistos na Fig. (4). No pente de curvatura nota-se, além do alinhamento, uma igualdade dos comprimentos dos segmentos de reta nos pontos de união das curvas, indicando  $G^2$ .

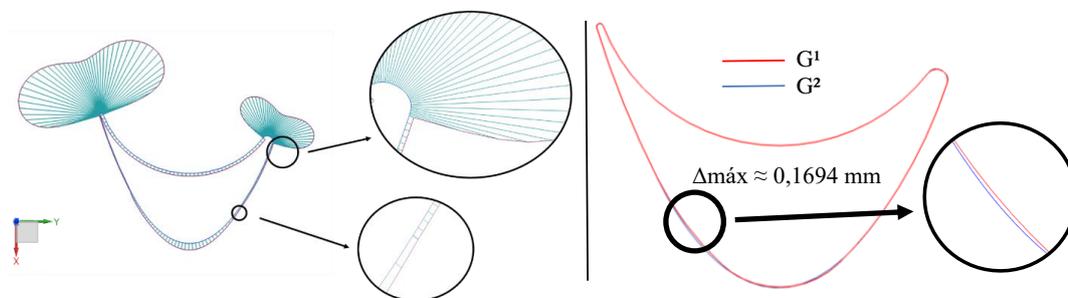


Figura 4 – Pente de curvatura da peça  $G^2$  (esquerda); desvio geométrico em relação à peça  $G^1$  (direita)

A geometria de continuidade  $G^3$  foi gerada de modo que o maior desvio geométrico em relação à peça original é de 0,26 mm. O pente de curvatura e o desvio geométrico podem ser vistos na Fig. (5). No pente de curvatura nota-se, além das características presentes em  $G^2$ , uma continuidade  $G^1$  na curva gerada pelo pente nos pontos de união das curvas. Isso significa continuidade na taxa de variação da curvatura e indica continuidade  $G^3$ .

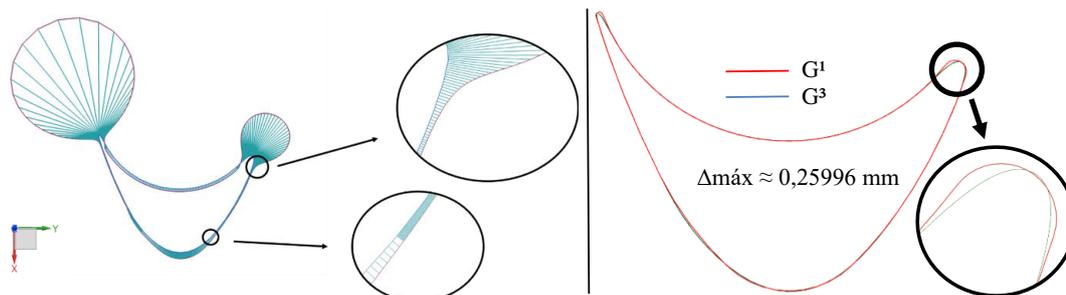


Figura 5 – Pente de curvatura da peça  $G^3$  (esquerda); desvio geométrico em relação à peça  $G^1$  (direita)

### 3.2 Análise de reflexão

Como forma de avaliar o nível de suavidade perceptível nas peças foi feita uma análise de reflexão, onde se observa a distorção produzida pela superfície quando esta reflete algum padrão de iluminação. O padrão de iluminação adotado no estudo foi de franjas horizontais binárias. Para efeitos de comparação, esta análise foi feita tanto no modelo CAD, através da ferramenta *reflection* fornecida pelo software NX 9 Siemens®, quanto nas peças fabricadas. O comprimento das peças no CAD foi estendido para 50 mm de modo a facilitar a visualização.

Uma vez que a trajetória CAM não é uma caracterização exata do modelo CAD, mas sim uma simplificação em segmentos de reta (que respeita determinada banda de tolerância), a peça real pode ser melhor representada pelos pontos da trajetória do que pelo modelo CAD inicial. Portanto, como forma de se obter uma visualização mais precisa da reflexão através do software, foi criada uma geometria alternativa para cada peça, modelada a partir dos pontos obtidos do software CAM. Para isso, foi necessária a obtenção dos pontos de contato ferramenta-peça (*cutter contact*) a partir dos pontos da trajetória (*cutter location*). A Fig. (6) demonstra o processo de criação destas geometrias.

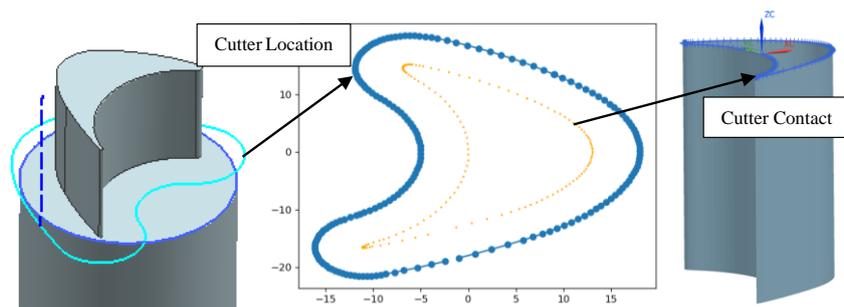


Figura 6 – Criação das geometrias alternativas

A fim de facilitar a comparação, os *cutter contact* foram também impressos e colados sobre as peças fabricadas. São representados por pontos na cor laranja, como é possível observar nas Fig. (7) a), b). Além disso, os pontos de descontinuidade (onde há o encontro de curvas) foram representados por pontos na cor vermelha; e na Fig. (7) a) destacados pelas setas. O teste foi realizado em um ambiente escuro com a aproximação das peças a um monitor contendo as franjas (Fig. (7) c)). Foi tentada a utilização de projetor como fonte de luz, no entanto o resultado foi inferior.

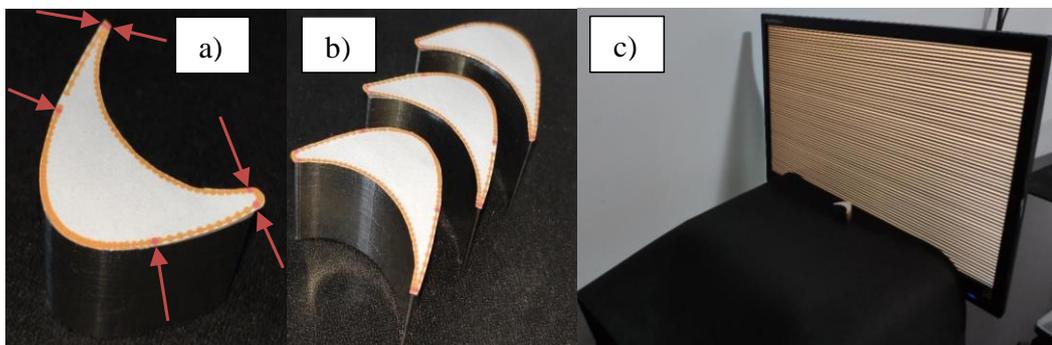


Figura 7 – (a) e (b) peças fabricadas; (c) ambiente usado no ensaio de reflexão

A Fig. (8) mostra uma comparação lado a lado dos testes de reflexão no CAD. Observação: embora as peças tenham pontos de descontinuidade espalhados ao longo de seus perfis (vide Fig. (7)), para fins de ilustração foi utilizada na Fig. (8) uma vista onde há maior destaque das distorções geradas pelas descontinuidades, mesmo não contendo todos os pontos.

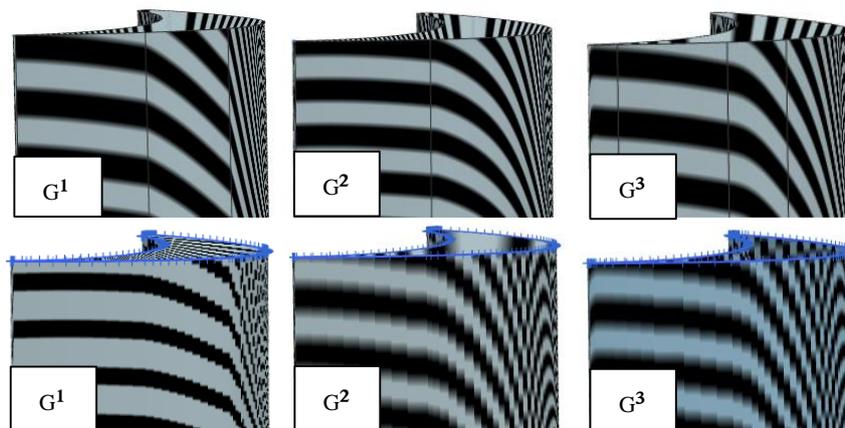


Figura 8 – Reflexão no CAD, lado a lado (geometrias modeladas a partir dos *cutter contact* na parte inferior; geometrias usuais na parte superior)

Como o posicionamento da fonte de luz no software não é de controle do usuário (é gerado automaticamente), visualizações de peças diferentes na mesma vista não podem ser fielmente comparadas. Mesmo assim, de modo geral, na observação no CAD percebeu-se que a mudança do nível de continuidade das curvas alterou de forma notável a percepção da suavidade das franjas nas geometrias usuais (parte superior da Fig. (8)). Os efeitos da mudança de  $G^1$  para  $G^2$  são mais impactantes do que da passagem de  $G^2$  a  $G^3$ .

Comparando a parte superior e inferior da Fig (8) nota-se que a representação do perfil da geometria com os segmentos de reta obtidos no CAM afetou a percepção das descontinuidades, reduzindo a distorção das franjas nestes pontos.

Nas observações feitas nas peças fabricadas, não foi possível notar mudança brusca na direção das franjas refletidas, diferentemente do sugerido pelo software para as geometrias usuais. Os resultados podem ser vistos nas Fig. (9) a (11):

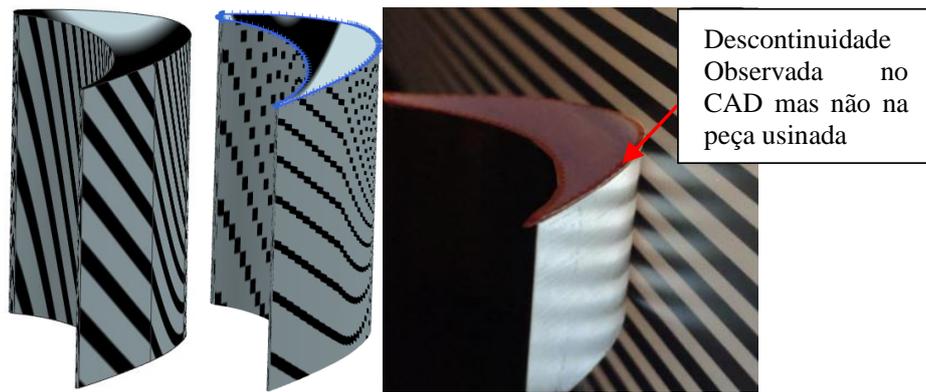


Figura 9 – Ensaio de reflexão da peça G<sup>1</sup>

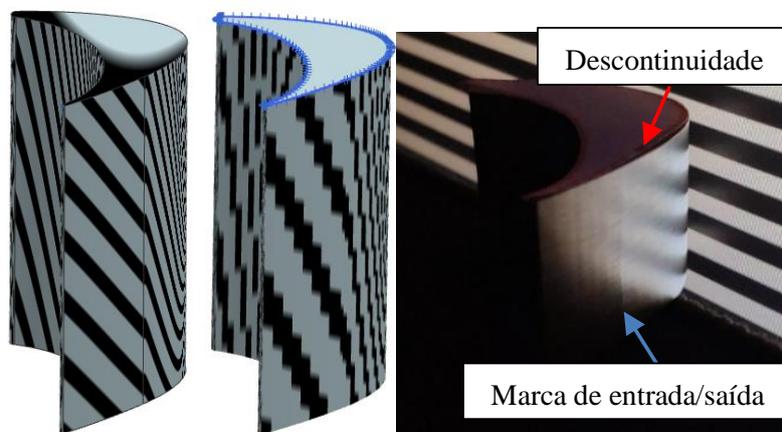


Figura 10 – Ensaio de reflexão da peça G<sup>2</sup>

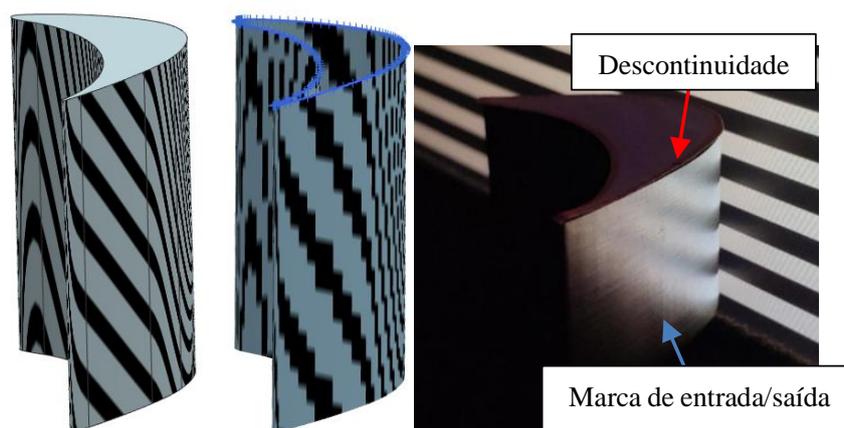


Figura 11 – Ensaio de reflexão da peça G<sup>3</sup>

Nas Fig. (10) e (11) (peças  $G^2$  e  $G^3$ ) é possível observar marcas de entrada/saída de ferramenta, logo à esquerda dos pontos de descontinuidade. Como em nenhuma das peças foi possível notar diferença de suavidade nos pontos de descontinuidade, infere-se que para este caso, um esforço no sentido de aumentar a continuidade geométrica na fase de projeção do componente não traria benefícios significativos, por mais que justificados teoricamente pelo modelo CAD.

Nas Fig. (9) a (11), observa-se que a direção das faixas refletidas no software CAD não se aproxima da direção obtida no ensaio real, mesmo que em ambos os casos as faixas projetadas sejam horizontais e as peças estejam em posições análogas em relação ao ponto de observação. Resultados semelhantes seriam de difícil obtenção pois não se tem clareza do posicionamento da fonte de luz no software, que certamente é diferente do utilizado no ensaio. Além disso, é visível a diferença de nitidez das faixas nos dois casos. Dois fatores podem ser postos como justificativa: o software considera uma intensidade luminosa (proveniente da fonte) uniforme ao longo da peça, o que não é uma boa aproximação para o caso; somado a isso, o software parece assumir uma superfície de refletividade especular.

Nas 3 peças foram notadas mudanças na direção das franjas (ainda que sutis) nos pontos onde, durante a usinagem, houve alteração no sentido de movimentação do eixo  $x$ , conforme a Fig. (12). As setas em vermelho nos itens b) e c) da figura demonstram as direções aparentes das retas tangentes às franjas projetadas na peça, antes e após as marcas.

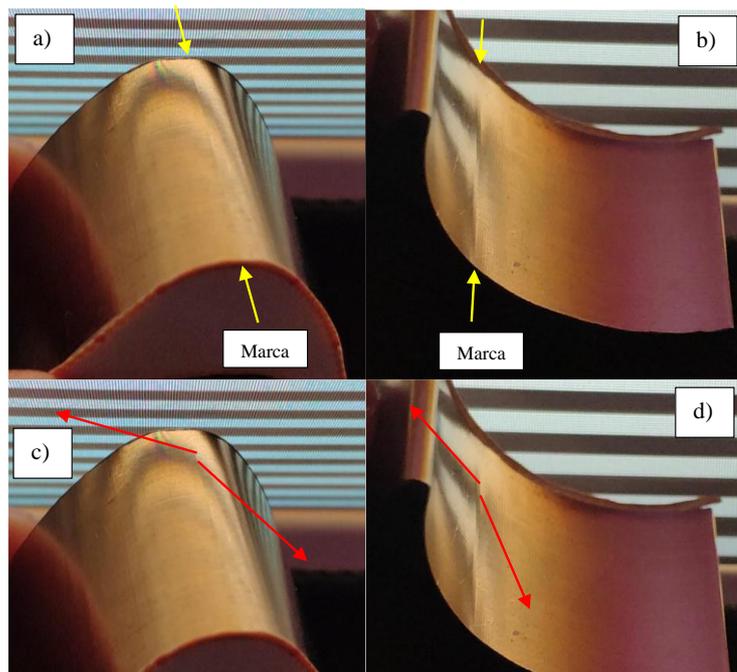


Figura 12 – Marcas nos pontos de inflexão do eixo x

#### 4. CONCLUSÃO

O presente trabalho estudou a relação entre o nível de continuidade do modelo CAD e o nível de suavidade percebido na peça fabricada. Para o caso estudado, a mudança do nível de continuidade do modelo CAD não gerou mudanças perceptíveis nas peças fabricadas. Os principais resultados podem ser listados como segue:

1. Com a ferramenta para simular a reflexão de luz sobre uma superfície foi possível observar mudança do nível de continuidade entre a superfície fornecida pela empresa e as superfícies re-modeladas. Contudo, não foi possível identificar o nível de continuidade nas superfícies fabricadas. Provavelmente isso ocorre pelo fato das trajetórias da ferramenta para a usinagem CNC serem descritas pela interpolação de segmentos de retas (comandos G01).
2. O ensaio de reflexão de luz realizado nas peças reais permitiu observar imperfeições de fabricação, oriundas principalmente da entrada e saída da ferramenta de corte na peça, pela oscilação das força de corte.
3. Com a ferramenta de reflexão do CAD, notou-se que a geometria alternativa, modelada a partir dos *cutter contact* (trajetória calculada pelo CAM), apresentou maior suavidade nos pontos de descontinuidade quando comparada com a

geometria usual. Este resultado é mais próximo do observado nas peças reais, de modo que o procedimento proposto (criação de uma geometria alternativa para análise de reflexão) seja um bom candidato a ser eficiente. Análises mais profundas poderiam ser conduzidas para confirmação.

4. É difícil reproduzir, na prática, a orientação e nitidez das franjas obtidas por simulação no CAD para validação em peças reais.

## 5. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Sugere-se estudar:

Qualificar, quantificar e identificar a origem dos erros geométricos nas peças complexas (material e geometria) fabricadas por usinagem, envolvendo: parâmetros de usinagem; ferramentas de corte; cálculo das trajetórias; processo de usinagem e máquina CNC.

## REFERÊNCIAS

- Agromayor, R., Anand, N., Müller, J. D., Pini, M., & Nord, L. O. (2021). A Unified Geometry Parametrization Method for Turbomachinery Blades. *CAD Computer Aided Design*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2020.102987>
- de Oliveira, E. L., de Souza, A. F., & Diniz, A. E. (2018). Evaluating the influences of the cutting parameters on the surface roughness and form errors in 4-axis milling of thin-walled free-form parts of AISI H13 steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(7). <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1250-1>
- Farin, G. (2002). Curves and Surfaces for CAGD. In *Curves and Surfaces for CAGD*. <https://doi.org/10.1016/b978-1-55860-737-8.x5000-5>
- Farin, G. (2016). Curvature combs and curvature plots. *CAD Computer Aided Design*, 80. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2016.08.003>
- Fernholz, K. D. (2013). Quantifying the visibility of surface distortions in class A automotive exterior body panels. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135(1). <https://doi.org/10.1115/1.4007984>
- Karčiauskas, K., & Peters, J. (2015). Can bi-cubic surfaces be class A? *Computer Graphics Forum*, 34(5), 229–238. <https://doi.org/10.1111/cgf.12711>
- König, W., Schroeter, R. B., & Weingaertner, W. L. (2002). *Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida - Parte I*.
- Souza, A. F., & Ulbrich, C. B. L. (2013). *Engenharia integrada por computador e sistemas CAD / CAM / CNC: princípios e aplicações* (2nd ed.). Artliber.