

MEDIÇÃO DE SUPERFÍCIES LIVRES: PARTICULARIDADES E CUIDADOS NA AVALIAÇÃO POR COORDENADAS

Maria Célia de Oliveira Papa, mcopapa@unimep.br¹
Alvaro José Abackerli, abakerli@ipt.br²

¹Universidade Metodista de Piracicaba, Rod. Luis Ometto km 1, Santa Bárbara d'Oeste – SP, 13451-900

²Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Av. Prof. Almeida Prado 532, São Paulo – SP, 05508-901

Resumo: Atualmente, as demandas ergonômicas, aerodinâmicas ou estéticas, entre outras, têm aumentado as exigências sobre os produtos com superfícies complexas (*complex surfaces*) ou superfícies livres (*free form surfaces*). O controle destas superfícies no contexto da engenharia reversa e da manufatura de alta velocidade (*high speed machining – HSM*) requer procedimentos e considerações específicas sobre os processos para permitir que o produto final ou seu protótipo seja comparado com as referências apropriadas para gerar resultados, que possam ser revisados frente aos requisitos da manufatura. Neste trabalho algumas particularidades geométrico-dimensionais da avaliação de superfícies livres são destacadas da literatura recente, para delas apontar aspectos particulares do controle das superfícies livres que não relevantes na avaliação das formas geométricas regulares. Os resultados mostram importantes diferenças que devem ser cuidadas desde a fase de projeto do produto até a produção final, para garantir as condições necessárias para a avaliação do produto depois de fabricado.

Palavras-chave: superfícies livres, medição por coordenadas, engenharia reversa.

1. INTRODUÇÃO

Muitos dos produtos consumidos pela sociedade moderna possuem formas diversificadas e até inusitadas, cujas superfícies combinam partes que possuem geometrias planas, cilíndricas e outras mais elaboradas. Estas superfícies são conhecidas como superfícies complexas (*complex surfaces*) ou superfícies livres (*free form*). Ao contrário das superfícies convencionais, as complexas não possuem eixos de rotação e podem assumir um grande número de formas, com características bastante distintas.

Desenvolver novos produtos com superfícies complexas é um aspecto crítico para as empresas, especialmente produtos com tecnologias inovadoras ou produtos diferenciados, que atendam aos gostos e necessidades de diferentes tipos de consumidores. Sabe-se também, que o rápido avanço da tecnologia exige que produtos inovadores sejam lançados ao mercado em um curto espaço de tempo, para garantir a condição de inovação. Estes problemas pressionam as empresas a explorar novos métodos de fabricação de produtos com superfícies complexas. Atualmente, o processo de manufatura de alta velocidade (*high speed machining – HSM*) é amplamente usado e altamente eficiente para resolver problemas relacionados à manufatura destes produtos.

Porém, este não é o único aspecto crítico existente no processo de manufatura destes produtos. Em geral, este processo ocorre em várias etapas. Primeiramente, um protótipo ou um modelo físico do produto é criado pelo pessoal de *design*. Por meio de um sistema de medição adequado e válido para superfícies complexas, o pessoal da metrologia mede este protótipo e coletam nuvens de pontos que o representam. Estas nuvens de pontos são usadas pelo pessoal da engenharia e computação para gerar um modelo teórico, por meio de um sistema *CAD* (*Computer Aided Design*). A partir deste modelo teórico, um molde ou matriz do produto é manufaturado, que posteriormente é novamente submetido a medições para coleta de outra nuvem de pontos. Desta nova nuvem de pontos gera-se um novo modelo, que representa o produto manufaturado. Este novo modelo pode ser comparado ao modelo teórico, por meio de um procedimento denominado de alinhamento, que verifica se os requisitos dimensionais e de qualidade do projeto foram atendidos. Esta seqüência de procedimentos é denominada Engenharia Reversa (ER).

Dos procedimentos executados pela ER, este estudo discute aspectos importantes sobre *HSM*, metrologia e modelagem de curvas que representa a superfície complexa. Desta forma, com respeito à metrologia serão analisados e discutidos diferentes sistemas de medição usados para medi-las, além dos métodos e técnicas válidas para realizar as medições, entre outros aspectos. Sobre a modelagem da curva são apresentadas questões relacionadas ao tipo de curva usada na modelagem destas superfícies, além da importância da adequada seleção dos pontos usados na modelagem e a utilização de um critério que verifica a melhor curva ajustada, dentre as possíveis curvas.

Atenção especial é dada a questões relacionadas à metrologia, que dentre outros aspectos importantes envolvidos no projeto do produto desempenha um importante papel, pois, dela derivam decisões importantes relacionadas à qualidade do produto manufaturado. Um dos grandes desafios da ER é garantir que estas medições sejam realizadas por meio de métodos e técnicas válidos para a coleta dos dados. Além disso, a ER deve garantir que os erros e incertezas inerentes ao processo de medição não afetem decisões importantes referentes às dimensões e qualidade dos produtos.

A discussão final deste estudo é baseada nas questões importantes da medição, cujos resultados podem ser verificados na etapa de alinhamento, quando se compara a curva teórica, que representa o protótipo de produto com a curva gerada pelas medições do produto manufaturado.

A apresentação deste artigo inicia-se com a definição e caracterização das superfícies complexas, de acordo com suas aplicações, seguida de aspectos importantes relacionados com a sua manufatura. O tópico 3 apresenta questões importantes sobre a metrologia para superfícies complexas. O tópico 4 mostra aspectos relacionados a modelagem. O tópico 5 apresenta um exemplo de alinhamento de curvas, o qual é usado para discutir questões importantes sobre este procedimento. Finalmente apresentaram-se algumas considerações finais.

2. SUPERFÍCIES COMPLEXAS

Diferentemente das superfícies convencionais, as complexas não possuem eixos de rotação e podem assumir formas que combinam diferentes geometrias (JIANG, *et al.*, 2007). De acordo com Sávio *et al.* (2007), as superfícies complexas são de grande importância para indústria, desde a fase de projeto até a manufatura de diversos produtos. Esta importância é dada tanto por questões estéticas como funcionais.

Do ponto de vista funcional pode-se dizer que a forma de muitos produtos é determinante para seu bom desempenho. Um exemplo disso é a turbina de diferentes tipos de máquinas, cuja geometria das superfícies de seus componentes estáticos e rotacionais é de grande importância, pois, desvios geométricos nas pás destas turbinas, por exemplo, podem gerar desperdícios de grande quantidade de energia durante seu funcionamento.

Com relação a questões estéticas considera-se que a forma e a aparência de muitos produtos causam maior impacto ao consumidor do que sua funcionalidade. Neste caso, o sucesso de diferentes tipos de produtos depende das características estéticas, desta forma, este aspecto deve ser motivo de preocupação para o pessoal da engenharia e manufatura destes produtos.

Aplicações de superfícies complexas são verificadas em diferentes tipos de produtos, em diversos segmentos industriais. Exemplos de aplicações são verificados na indústria automobilística, aeronáutica, aeroespacial e de eletrodomésticos, equipamentos e acessórios usados na área de saúde, especialmente no projeto e manufatura de moldes e matrizes, usados por estas indústrias. Charlton e Blunt (2008) destacam aspectos importantes sobre a manufatura e a medição de superfícies complexas em indústrias que fabricam próteses ortopédicas para juntas de joelhos. Neste tipo de aplicação é importante, além da alta qualidade relacionada com as dimensões da superfície, também a qualidade em relação a sua rugosidade, o que torna seu projeto e manufatura aspectos bastantes críticos.

Jiang *et al.* (2007) discutem aspectos importantes sobre a caracterização das superfícies complexas, cujas topologias apresentam micro-formas. O autor apresenta diversas aplicações, especialmente de empresas que fabricam produtos de vidro, como por exemplo, faróis de automóveis, lentes de câmaras fotográficas, impressoras, *scanners* e outros itens utilizados na fabricação de equipamentos de telecomunicação, automóveis e produtos biomédicos.

Uma aplicação que discute um método para modelar superfícies de família de produtos é apresentada por Fu *et al.* (2008). Neste estudo, os autores analisam a diferença na forma entre um produto e outro, da mesma família, o que na maioria das vezes são sutis e, para os quais os sistemas de medição e modelagens tradicionais não são suficientes. Para ilustrar o método usado, os autores discutem uma aplicação na fabricação de moldes da parte externa de câmaras fotográficas.

Além destas aplicações, outros exemplos são verificados em Nowicki e Szafarczyk (1993), Meneghello *et al.* (2007), Yiu e Tam (2007) entre outros.

Um dos primeiros obstáculos encontrado pela ER é a caracterização das superfícies complexas. Esta caracterização inclui primeiramente definir as características da geometria que compõe a superfície, e posteriormente, selecionar um modelo ou curva que representem esta superfície. Com relação à definição das formas da superfície, Jiang *et al.* (2007) fazem uma breve classificação, de acordo com as suas aplicações. Os autores classificam as superfícies complexas em três classes distintas. A primeira classe compreende as superfícies que possuem degraus, bordas e facetas, como por exemplo, partes internas de faróis de carros. Na segunda classe estão as superfícies com padrão de estruturas repetidas ou que possuem formatos de mosaicos, que é constituído de matrizes com pequenas geometrias, como por exemplo, triângulos e micro pirâmides, superfícies abrasivas caracterizam aplicações desta classe. A terceira classe é composta de superfícies lisas, como por exemplo, lentes óticas. A discussão deste estudo será feita, principalmente em termos das superfícies classificadas pelos autores na terceira classe.

Outra etapa importante relacionada a superfícies complexas é o processo de manufatura usado para a fabricação destas superfícies. Neste estudo discute-se a utilização da *HSM*. A opção por este processo é motivada pela possibilidade de integração entre os sistemas *CAD* e o processo de manufatura. Esta integração permite aumentar a complexidade geométrica da superfície e conseqüentemente melhorar a concordância entre o modelo teórico correspondente ao projeto do produto e o item manufaturado (RUFFO *et al.*, 2007).

Outra vantagem da utilização da *HSM*, segundo Buswell *et al.* (2008) é a facilidade para manufaturar uma grande variedade de itens, porém em pequenas quantidades. Esta possibilidade permite atender aos diferentes gostos dos

clientes e as rápidas mudanças nos modelos e formas dos produtos, além de atender aos requisitos de melhoria contínua referentes à funcionalidade dos produtos. De forma geral, a *HSM* apresenta as seguintes vantagens em relação aos processos convencionais de manufatura de superfícies complexas: redução do tempo de manufatura e dos custos; aumento da produtividade; aumento da eficácia do produto, principalmente para atender os diferentes gostos dos clientes; a disponibilidade de diversos e distintos tipos de produtos.

Diferentes questões filosóficas e técnicas além de diversas aplicações em manufatura de alta velocidade para superfícies complexas são verificadas em Linsen *et al.* (2008), Wu *et al.* (2007), Tewold e Sheng (2008), Buswell *et al.* (2008) e Malone, *et al.* (2008).

Apesar da importância do processo de manufatura, este estudo volta-se principalmente aos desafios encontrados para a medição precisa da superfície manufaturada, para posteriormente verificar se esta superfície atende aos requisitos dimensionais e de qualidade estabelecidos no projeto. Para fundamentar esta abordagem, o tópico seguinte discute questões relacionadas aos sistemas de medição usados para superfícies complexas.

3. SISTEMAS DE MEDIÇÃO PARA SUPERFÍCIES COMPLEXAS

Existem diferentes sistemas de medição usados para medir superfícies complexas. Porém, realizar estas medições de forma precisa é um desafio, devido principalmente à complexidade das características destas superfícies. Na prática, para que estas medições sejam realizadas de maneira confiável é preciso, primeiramente, selecionar métodos que sejam válidos para as condições exigidas nestas medições.

As diferenças existentes entre os diferentes sistemas de medição referem-se principalmente com os níveis de precisão e custos variados destes sistemas. A escolha adequada depende dos resultados desejados, do tipo de aplicação e também dos recursos disponíveis. Segundo Savio *et al.* (2007), os sistemas de medição mais usados para medir superfícies complexas são:

- **Sistemas metrológicos de larga escala:** é um sistema de medição usado para medir peças grandes. Este sistema deve ser capaz de realizar medições usando grandes escalas (metros). As técnicas usadas neste sistema são os rastreadores laser, fotogrametria e radares laser.

Os rastreadores laser medem a posição de um alvo portátil independente, que é posicionado manualmente por um operador na superfície a ser medida. Quando o operador movimenta este alvo o rastreador acompanha o movimento enquanto funciona como um *scanner* que mede cerca de 3000 pontos sob o alvo.

A fotogrametria são medições em fotos e outras fontes de informações que determinam de modo geral, o posicionamento relativo dos pontos. Neste sistema, é possível determinar distâncias, ângulos, áreas, volumes, elevações, tamanhos e formas de objetos.

O radar laser é um sistema que usa um laser que realiza medições sem contato em um raio de cerca de 60 metros. A principal vantagem deste sistema é o processo de medição completamente automatizado. Detalhes sobre estes sistemas e técnicas são encontrados em Peters *et al.* (2001), Kim *et al.* (2002)

- **Máquina de Medir por Coordenadas (MMC):** é o sistema de medição mais usado pelas indústrias na medição de superfícies complexas. Estes sistemas compreendem máquinas equipadas com Comandos de Controles Numéricos (CNC) e *scanners*, ambos capazes de realizar medições com ou sem contato. As MMCs são facilmente programadas e podem medir milhares de pontos, mesmo em superfícies complexas, com grande precisão. Em geral, para situações em que a precisão geométrica de uma superfície livre é crítica para o desempenho funcional do produto, ela é medida usando uma MMC equipada com um apalpador com contato que *scaneia* o perfil da superfície.

Diversos autores apresentam estudos com aplicações que consideram as MMCs como o sistema de medição mais usado na prática, para medir superfícies complexas. Entre estes estudos estão Savio e Chiffre (2002), Shiou e Chen (2003), Lin e Sun (2003) e Weckenmann *et al.* (2004).

- **Sistemas Ópticos:** Assim como os sistemas de medição de larga escala, os sistemas ópticos não necessitam de deslocamentos controlados enquanto realizam as medições. Este sistema utiliza basicamente duas técnicas. Na primeira, a posição do ponto a ser medido é calculada via triangulação óptica, que diferentemente da fotogrametria que mede superfícies usando um alvo físico (foto ou outras fontes de informações), esta técnica mede sem alvos físicos.

A segunda técnica é chamada deflectometria, que consiste em um sistema de medição em reflexão. Este sistema é apropriado para medir curvaturas e irregularidades nas superfícies. Kong *et al.* (2007) descreve uma aplicação deste sistema de medição.

- **Interferometria:** É um sistema de medição óptico de alta precisão, que permite obter medidas de deslocamentos em várias escalas. A engenharia de precisão tem destacado cada vez mais o uso da interferometria a laser. Basicamente, pode-se entender o interferômetro como um sistema que mede pelo princípio de intensidade de luz, captada por um Foto-diodo, que mede a variação da intensidade luminosa, determinando o deslocamento.

- **Perfilometria:** Indicado para medir profundidade e dimensões de estruturas, rugosidade e perfis em geral. No contexto de superfícies complexas, é indicado para medir superfícies com degraus. Assim, este sistema também mede superfícies irregulares e com padrões repetidos, como por exemplos, as superfícies com

aspectos de mosaico. Neste caso, a medição é realizada por meio de sensores lasers dispostos em uma barra acoplada a um veículo.

- **Sistemas para metrologia de micro/nano escala:** Indicado para medir superfícies pequenas. Nestes sistemas são realizadas medições que não são adequadas às MMCs, para isso, são usados micro apalpadores. O grande problema existente nestes sistemas é a alta precisão de micro apalpadores para medições de superfícies de formas curvas.

- **Outros sistemas:** Dois sistemas de medição são considerados neste tópico: a Tomografia Raios-X que é uma técnica de medição dimensional nova e poderosa. Fundamentalmente, este sistema consiste de um emissor de raios-X, um detector, um aparelho eletrônico ou computacional para coleta e elaboração dos dados.

O segundo sistema é o sensor ultra-sônico usado para medir características interiores de texturas das superfícies e detectar imperfeições causadas pelo uso de múltiplos materiais, especialmente componentes críticos em termos de segurança.

Neste artigo, as discussões foram baseadas em medições realizadas em MMC, pelo fato deste sistema ser o mais usado na prática das indústrias. Uma questão importante no contexto de medições por MMC é em muitos casos, a dificuldade em realizar as medições diretamente, devido a algum tipo de restrição. Para auxiliar nestas medições, existem alguns artifícios que facilitam ou permitem sua realização.

Um exemplo destes artifícios é verificado em Sávio e Chiffre (2002), que propõem utilizar um artifício para situações que os instrumentos de medição não são capazes de medir de forma precisa algumas características da superfície, devido a limitações físicas. Este artifício consiste de um artefato calibrado que substitui a superfície medida. Este artefato compreende a combinação de itens com geometrias regulares, calibrado em suas dimensões, formas e posições relativas, cujas informações sobre as geometrias são obtidas de um modelo CAD. A principal limitação no uso deste método é a necessidade de utilizar artefatos periodicamente calibrados, o que na prática, muitas vezes, se torna inviável devido aos altos custos da calibração.

Outra questão importante é a utilização de estratégias de medição válidas, que permitam coletar dados suficientemente bons para a modelagem da superfície. Shiou *et al.* (2003) sugerem como combinação ótima apalpadores com diâmetros menores diâmetros, com medições realizadas com menores distâncias entre as coordenadas. Outros estudos realizados por autores como Abackerli (2007), Shoiu e Chen (2003), Lin e Sun (2003), Weckenmann *et al.* (2004), Cheung *et al.* (2007), descrevem experimentos e aplicações com combinações ótimas de fatores relacionados à medição de superfícies complexas usando MMCs, para coletar dados que permitam modelar curvas que representem de forma correta a superfície.

A primeira etapa após a realização das medições é a modelagem da superfície a partir dos pontos coletados. Porém, antes disso é preciso selecionar a curva que melhor represente a superfície complexa avaliada. Esta seleção envolve problemas como a definição de quais dos pontos medidos devem ser considerados nesta modelagem. Esta seleção é necessária, pois o modelo se torna mais complexo à medida que o número de pontos usados na modelagem aumenta. Isso ocorre, pois o número dos parâmetros do modelo curva cresce em função do número de pontos usados.

De acordo com Piegl e Tiller (2008), os dados que compõe a nuvem de pontos da superfície medida não assumem qualquer forma ou distribuição particular, mas cada um destes pontos assume ter a mesma significância. Desta forma, é possível, para uma determinada aplicação, omitir alguns pontos que estão muito próximos, ou então acrescentar pontos para torná-los mais próximos, por meio de operações de filtragem dos pontos. Dentre as operações sugeridas está a filtragem por segmentação. Neste caso, a superfície é dividida em sub-regiões homogêneas, que permitam isolar a forma da superfície de interesse. Detalhes sobre este método podem ser verificados em Kim *et al.* (2002), Savio *et al.* (2007) e Stamati e Fudos (2007).

O próximo tópico descreve os procedimentos para a modelagem da superfície complexa, a partir dos pontos selecionados.

3.1. Modelagem de Superfícies Complexas

Em geral, os sistemas CAD descrevem superfícies complexas usando curvas paramétricas. Estas curvas paramétricas podem ser descritas de diferentes formas, porém, a mais completa delas são as curvas *NURBS* (*Nonuniform Rational B-Splines*). As demais curvas usadas são derivadas ou simplificações de *NURBS*. Segundo Savio *et al.* (2007), o motivo da grande popularidade das curvas *NURBS* para modelar superfícies complexas é devido a suas interessantes propriedades, tais como a habilidade para representar vários tipos de superfícies, controle local da forma da curva ou superfície e habilidade para representar superfícies analíticas simples como as planas, cilíndricas, cones, entre outras. Uma curva *NURBS* é definida da seguinte forma

$$p(u, v) = \frac{\sum_{i=1}^{n_u} \sum_{j=1}^{n_v} B_{ui}(u) B_{vj}(v) w_{ij} c_{ij}}{\sum_{i=1}^{n_u} \sum_{j=1}^{n_v} B_{ui}(u) B_{vj}(v) w_{ij}} \quad (1)$$

em que,

p é um ponto na superfície

u e v são parâmetros de localização de dados

n_u e n_v são os números de pontos controles na direção u e v

$B_{ui}(u)$ e $B_{vj}(v)$ são as funções *B-Spline* normalizadas na direção u e v .

C_{ij} são os pontos que controlam a forma da superfície e w_{ij} suas respectivas ponderações. Quando todas as ponderações valem 1, a superfície *NURBS* se torna uma superfície *B-Spline* (PIEGEL E TILLER, 1997).

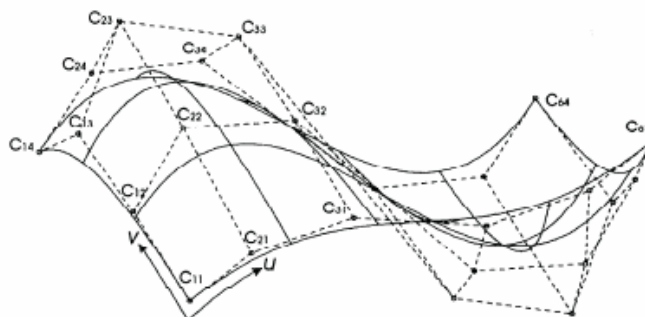


Figura 1. Exemplo de uma NURBS com parâmetros de localização u e v .

Fonte: Sávio *et al.* (2007).

A Fig. (1) descreve a forma de uma curva que representa a Eq. (1), com parâmetros de localização de dados u e v .

Sunil e Pande (2008) associam a *NURBS* a um método de reconstrução automática das características de uma superfície complexa de um modelo *CAD* representado em formato *STL*, que é universalmente reconhecido por todos os sistemas *CAD/CAM* (*Computer Aided Manufacturing*) existentes. O método proposto é capaz de reconhecer e modelar uma grande variedade de partes sobresalientes e depressões comumente encontradas em peças de metais, como por exemplo, parte de carrocerias e motores de carros. Nesta área é preciso garantir a robustez das regiões segmentadas da superfície, assim, os autores descrevem o método em termos das *NURBS* para desenvolver um poderoso algoritmo que reconhece características como franjas, entalhes entre outros.

Brecher *et al.* (2006) discutem a utilização de *NURBS* em aplicações cuja precisão das formas e alta qualidade da superfície em termos de rugosidade é imprescindível, como por exemplo, na indústria de elementos ópticos.

Piegel e Tiller (2008) apresentam um algoritmo baseado em um estudo empírico capaz de ajustar partes esféricas e planas de uma superfície complexa, a partir de dados aleatórios usando *NURBS*. Este algoritmo seleciona um ajuste automático que determina se um plano ou esfera possibilita melhor ajuste.

Cugini e Bordegoni (2007) e Dan e Lancheng (2006) desenvolvem estudos relacionadas à Engenharia Reversa no contexto de projetos industriais. Sendo que o segundo trabalho trata de ferramentas virtuais que simulam a construção de protótipos e o ajuste das curvas das superfícies dos produtos por meio de *NURBS*. Estas ferramentas de simulação são muito importantes, principalmente no desenvolvimento de novos, pois permitem, por meio de simulação, gerar e avaliar protótipos, possibilitando a redução de custos e tempo de lançamento do produto no mercado. Esta ferramenta é muito utilizada pelas indústrias automotivas.

Outros estudos importantes que utilizam as curvas *NURBS* para modelagem de superfícies complexas são Warren e Waggenspack (1994), Chen e Lui (1997), Brujic *et al.* (2001), Fitzgibbon (2003), Dan e Wang (2006).

Após a modelagem é importante verificar se o modelo ajustado é o que melhor representa a superfície medida, dentre os possíveis modelos. Uma das formas de se verificar isso é por meio uma abordagem Bayesiana, denominado *BIC* (*Bayesian information criterion*). Li e Liu (2003) utilizaram este critério para a seleção de modelos em problemas de superfícies complexas, cujos pontos medidos foram modelados por curvas *B-splines*.

O tópico final deste artigo parte de todos os assuntos até aqui apresentados, para discutir os problemas verificados na comparação entre a curva teórica obtida pelo modelo *CAD* e a curva obtida pela modelagem dos pontos medidos da superfície manufaturada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Sabe-se que a prática comum usada pela ER para verificar se a superfície complexa manufaturada atende aos requisitos dimensionais e de qualidade, definidos no projeto, é comparar as curvas teóricas com as curvas do produto manufaturado. Este procedimento é conhecido como alinhamento dos dados. Segundo Savio *et al.* (2007), alinhamento de dados significa encontrar a correspondência entre o sistema de coordenadas medidas e o sistema de coordenadas nominal da superfície. Existem diversos *softwares* que realizam este procedimento. Em geral, estes *softwares* usam técnicas baseadas no método de mínimos quadrados. Esta técnica minimiza a soma dos quadrados dos desvios da

superfície medida em relação à superfície teórica. A Figura 2 apresenta um exemplo da saída de resultados de um destes softwares.

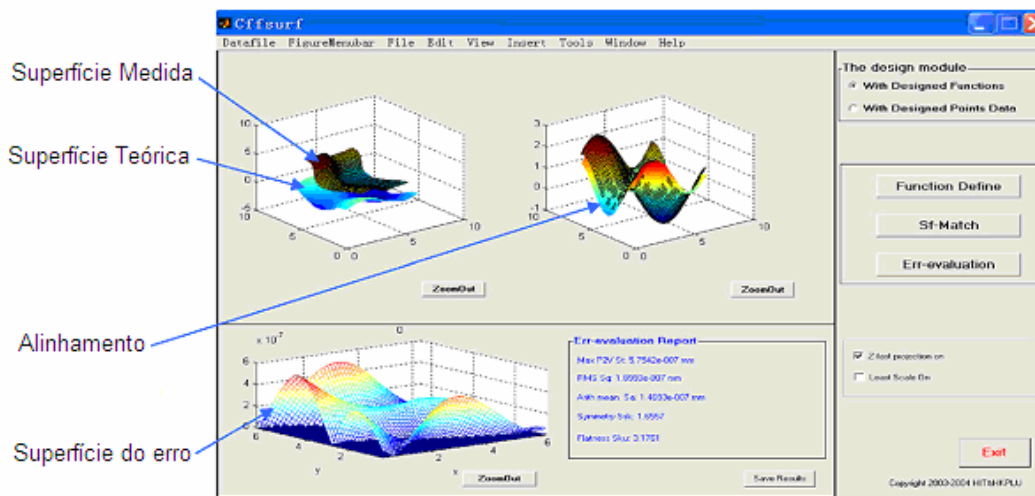


Figura 2: Exemplo de um alinhamento entre a superfície teórica e a superfície medida.

Fonte: Cheug *et al.* (2007).

Observa-se na Figura 2 a superfície teórica, que corresponde à superfície definida no projeto como sendo a ideal. A partir de medições realizadas na superfície manufaturada e da modelagem de um modelo adequado para representar a superfície, tem-se a superfície medida. A técnica de alinhamento possibilita obter a superfície de erro, que representa a diferença entre o modelo definido no projeto e o modelo do produto manufaturado. Idealmente, a forma desta superfície de erro deve ser zero.

Em termos práticos, esta superfície de erros corresponde a erros e incertezas significativas, que são referentes aos processos de manufatura, medição e modelagem, observados na superfície avaliada. Esta superfície de erro é muito comum na prática, pois são decorrentes dos erros e incertezas inerentes aos processos envolvidos desde a fase de projeto até a modelagem da superfície do produto manufaturado.

Como o alinhamento busca encontrar a correspondência entre o sistema de coordenadas medida e o sistema de coordenadas nominal da superfície, estudos desenvolvidos por Cheung *et al.* (2007) alertam para alguns cuidados que devem ser tomados no processo de alinhamento. Dentre os problemas encontrados, os autores alertam para questões relacionadas à rotação e posição das coordenadas x , y e z . Além disso, à medida que o número de pontos medidos aumenta o desvio entre ambas as superfícies, teórica e medida, diminui. Em outras palavras, pode-se concluir que, a precisão do resultado do alinhamento aumenta com o aumento do número de pontos medidos.

Além disso, as características e parâmetros da superfície de erros possuem informações importantes sobre a qualidade do produto manufaturado. Por isso, devem ser cuidadosamente analisadas pelo pessoal da ER. Sabe-se da prática, que as causas destes desvios podem ser devido a diversas fontes de variação, como o processo de manufatura, medição e modelagem da superfície. Com respeito ao processo de manufatura, pode-se dizer que a temperatura e o método de usinagem são fatores considerados significativos. Com relação ao processo de medição, fatores relacionados ao sistema de coordenadas e às técnicas de medição, além das incertezas inerentes ao próprio processo, são fontes importantes. No processo de modelagem, o método adequado para seleção dos pontos usados e o método que verifica a adequação do modelo ajustado também podem ser causas importantes deste desvio.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Cada vez mais os produtos modernos trazem em suas características formas denominadas de superfícies complexas ou livres. Esta demanda atinge diferentes segmentos industriais, desde as empresas aeroespaciais até as de equipamentos domésticos e de produtos de saúde. Este aumento requer estudos que busquem melhores condições de manufatura, especialmente relacionadas aos requisitos de melhoria contínua da qualidade ou desenvolvimento de novos produtos. Atenção especial é dada a produtos que possuem especificações consideradas críticas, cujos requisitos de segurança dependem da qualidade de sua superfície e precisão das dimensões de suas formas, como é o caso de aplicações encontradas nas indústrias automobilísticas, aeroespacial, de saúde, dentre outros.

Neste estudo, buscou-se apresentar e discutir questões importantes relacionadas à manufatura, medição e modelagem de superfícies complexas, especialmente, com relação à medição. Para avaliar a qualidade da superfície manufaturada discutiu-se a técnica de alinhamento, que permite verificar o desvio entre ambas as superfícies, teórica e medida. Em termos práticos, esta superfície de erros, dada por este desvio, permite avaliar a qualidade da superfície

manufaturada frente as suas especificações funcionais ou estéticas. Nota-se da discussão que, cuidados especiais devem ser tomados desde a fase do projeto, até o procedimento de alinhamento, buscando reduzir ao mínimo a superfície do erro. Além disso, alerta-se para a necessidade de estudos que permitam minimizar a superfície do erro.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e a FAPESP pelo apoio concedido na realização deste projeto.

7. REFERÊNCIAS

- Abackerli, A. J., 2007, "Medição nas decisões sobre a Usinagem: o Problema da Localização", In SCPM – Seminário Internacional de Alta Tecnologia, Piracicaba.
- Brecher, C., Lange, S., Merz, M., Niehaus, F., Wenzel, C. and Winterchaden, M., 2006, "NURBS Based Ultra-Precision Machining", *Annals of the CIRP*, Vol. 55, pp. 547-550.
- Buswell, R. A., Thorpe, A., Soar, R. G. and Gibb, A. G. F., 2008, "Design, data and process issues for mega scale rapid manufacturing machines used for construction, *Automation in Construction*", *in press*.
- Charlton, B. and Blunt, L., 2008, "Surface and Form Metrology of Polished Freeform Biological Surfaces", *Wear*, Vol. 264, pp. 394-399.
- Chen, Y. H. and Liu, C. Y., 1997, "Robust segmentation of CMM data based on NURBS", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.13, pp. 530-534.
- Cheung, C. F., Li, H. F., Lee, W. B., To, S. and Kong, L. B., 2007, "An Integrated from Characterization Method for Measuring Ultra-Precision Freeform Surfaces", *Machine Tools & Manufacture*, Vol.47, pp.81-91.
- Cugini, U. and Bordegoni, M., 2007, Touch and Design Novel Haptic Interfaces for the Generation of High Quality Surfaces for Industrial Design", *Visual Computing*, Vol.23, pp. 233-246.
- Dan, J. and Lancheng, W., 2006, "An Algorithm of NURBS Surface Fitting for Reverse Engineering", *International Journal of Manufacture Technology*, Vol.31, pp. 92-97.
- Fitzgobbon, A. W., 2003, "Robust Registration of 2D and 3D Points Set", *Image and Vision Computing*, Vol.21, pp. 1145-1153.
- Fu, J., Joshi, S. B. and Simpson, T. W., 2008, "Shape Differentiation of Freeform Surfaces Using a Similarity Measure Based on an Integral of Gaussian Curvature", *Computer Aided Design*, Vol.40, pp. 311-323.
- Jiang, X., Scott, P., Whitehouse, D., 2007, "Freeform Surface Characterization – A Fresh Strategy", *Annals of the CIRP*, Vol.56, pp. 553-556.
- Kim, H. C., Hur, S. M. and Lu, S. H., 2002, "Segmentation of the Measured Point Data in Reverse Engineering", *Advanced Manufacturing Technology*, Vol.20, pp. 571-580.
- Kong, L. B., Cheung, C. F., To, S. and Lee, W. S., 2007, "Measuring Optical Freeform Surfaces Using a Coupled Reference Data Method", *Measurement Science and Technology*, Vol.18, pp. 2252-2260.
- Li, Y. F. and Lui, Z. G., 2003, "Method for Determining the Probing Points for Efficient Measurement and Reconstruction of Freeform Surfaces", *Institute of Physics Publishing*, Vol.14, pp. 1280-1288.
- Lin, Y. C. and Sun, W. I., 2003, "Probe Radius Compensated by the Multi-Cross Product Method in Freeform Surface Measurement with Touch Trigger Probe CMM", *Advanced Manufacturing Technology*, Vol.21, pp. 902-909.
- Linsen, Z., Yanping, T., Hongzan, B., Qingxiu, F. and Caihua, X., 2008, "Study on Symmetrical Machining Technology", *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol.36, pp. 844-851.
- Meneghello, R., Concheri, R. and Savio, G. and Comelli, D., 2006, "Surface and Geometry Error Modeling in Brittle Mode Grinding of Ophthalmic Lenses Moulds", *International Journals of Machine Tools & Manufacture*, Vol.46, pp. 1662-1670.
- Malone, E., Berry, M. and Lipson, H., 2008, "Freeform Fabrication and Characterization of zn-air Batteries", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 14, pp. 128-140.
- Nowicki, B. and Szafarczyk, M., 1993, "The New Method of Free-form Surface Honing", *Annals of the CIRP*, Vol.42, pp. 425-438.
- Peters, J., Bryan, J. B., Estler, W. T. and Evans, C.; *et al.*, 2001, "Contribution of CIRP to the Development of Metrology and Surface Quality Evaluation during the Last Fifty Years", *Annals of the CIRP*, Vol.50, pp.1-16.
- Piegel, L. A. and Tiller, W., 1997, *The NURBS book*", second edition, Springer, USA, 646p.
- Piegel, L. A., Tiller, W., 2008, "Fitting NURBS Spherical Patches to Measured Data", *Engineering with Computers*, Vol.24, pp. 97-106.
- Savio, E. and Chiffre, L., 2002, "An artefact for Traceable Freeform Measurements on Coordinate Measuring Machines", *Journal of International Societies Engineering and Nanotechnology*, Vol.26, pp. 58-68.
- Savio, E., Chiffre, L., Schmitt, R. *et al.*, 2007, "Metrology of Freeform Shaped Parts", *Annals of the CIRP*, Vol.56, p. 810-835.
- Shiou, F. J. and Chen, M. J., 2003, "Intermittent Process Measurement of a Freeform Surface Profile with a Circular Triangulation Laser Probe on a Machining Centre", *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 21, pp. 354-376.
- Shiou, F. J., Lin, Y. F., and Chang, K. H., 2003, "Determination of the Optimal Parameters for Freeform Surface Measurement and Data Processing in Reverse Engineering", *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol.21, pp. 678-690.

- Stamati, V. and Fundos, I., 2007, "A Feature Based Approach to Re-engineering Objects of Freeform Design by Exploiting Point Cloud Morphology", SPM, Vol. 06, pp.
- Sunil, V. B. and Pande, S.S., 2008, "Automatic Recognition of Features from Freeform Surface CAD Models", Computer-Aided Design, Vol. 40, pp. 502-517.
- Ruffo, M., Tuck, C. and Hague, R., 2007, "Make or Buy Analysis for Rapid Manufacturing", Rapid Prototyping, Vol. 13, pp. 23-29.
- Tewolde, G.S., Sheng, W., 2008, "Robotic Path Integration in Manufacturing Process: Genetic Algorithm versus Ant Colony Optimization", IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, Vol. 38, pp. 278-287.
- Warren, N. and Waggenspack, J., 1994, "NURBS Based Free-form Deformation", IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.14,
- Yiu, K. L. and Tam, H. Y., 2007, "An Alternate Approach to Free-form Surface Fabrication", Journal of Materials Processing Technology, Vol.192, pp. 465-469.
- Weckenmann, A., Estler, T., Peggs, G. and Mc MURTRY, 2004, "Probing Systems in Dimensional Metrology", Annals of the CIRP, Vol. 53, pp. 657-684.
- Wu, X., Kita, Y. and Ikoku, K., 2007, "New Polishing Technology of Free Form Surface by GC", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 187, pp. 81-84.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

FREE FORM SURFACE MEASUREMENTS: PARTICULAR ISSUES AND CARE FOR COORDINATE EVALUATION

Maria Célia de Oliveira Papa, mcopapa@unimep.br¹
Alvaro José Abackerli, abakerli@ipt.br²

¹Universidade Metodista de Piracicaba, Rod. Luis Ometto km 1, Santa Bárbara d'Oeste – SP, 13451-900

²Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Av. Prof. Almeida Prado 532, São Paulo – SP, 05508-901

Abstract. *Today, ergonomic demands, aerodynamics or aesthetic design, between others, have increased the demands upon products with complex or freeform surfaces. The control of such surfaces in the reverse engineering context and for high speed machining – HSM require procedures and specific considerations about the processes, to allow that final products or their prototypes to be correctly compared with the appropriate references, yielding results that can be checked against manufacturing specifications. In this paper, some geometric-dimensional issues regarding freeform surfaces evaluation are pointed out from recent literature, to derive particular aspects of freeform surfaces that are of special concern in their control but are not an issue when controlling the so called regular geometric forms. Results show important differences to be taken care of since the product design phase until the final production to guarantee the necessary conditions for product evaluations after its manufacturing.*

Keywords: *freeform, measurement for coordinate, reverse engineering.*