

01.

A Prototipagem Rápida aplicada à avaliação ergonômica: estudo comparativo entre um mock-up produzido manualmente e outro obtido por uma fresadora CNC

The Rapid Prototyping applied to ergonomic evaluation: a comparative study between a handmade mock-up and another obtained by CNC milling machine

Paula Lumi Goulart Nishimura
UNESP
lumi.paula@gmail.com

Paulo Guilherme Simão Kick
UNESP
paulo.kick@gmail.com

Osmar Vicente Rodrigues
UNESP
osmar@faac.unesp.br

Galdenoro Botura Junior
UNESP
galdenoro@gmail.com

Luis Carlos Paschoarelli
UNESP
paschoarelli@faac.unesp.br

A Ergonomia é a ciência responsável pela adequação das condições do trabalho ao trabalhador e a sua utilização pode proporcionar melhor desempenho, maior conforto e segurança na execução de diversas tarefas. É uma ciência interdisciplinar, que possui ligações com o Design e pode colaborar na criação de produtos funcionais, otimizados e que não prejudiquem a saúde humana. Para tal, ao longo do desenvolvimento de um produto, é necessária a realização de estudos e testes, que podem ser feitos por meio de modelos, mock-ups e protótipos. Estes podem ser produzidos de diversas maneiras, que podem envolver desde processos manuais até os automatizados e ou digitais, como as tecnologias de Prototipagem Rápida (PR), por exemplo. Este estudo teve como objetivo comparar dois mock-ups de descascadores de alimentos semelhantes, produzidos de formas diferentes - um produzido manualmente a partir de uma resina epóxi (Durepoxi), e outro por meio de uma tecnologia subtrativa de PR, utilizando uma Fresadora CNC Roland MDX 540. Para fins comparativos, foram levadas em consideração as variáveis preço, tempo de produção, qualidade e acabamento superficial, precisão dimensional e Ergonomia do modelo. Como resultado, obteve-se dois modelos distintos, com vantagens e desvantagens em diferentes aspectos, cujas técnicas de produção ao serem conciliadas podem resultar em um processo de desenvolvimento de produto (PDP) ainda mais completo e vantajoso.

Palavras-chave Mock-up, Ergonomia, Prototipagem Rápida

Ergonomics is the science responsible for the suitability of the employee's working conditions and its use can provide better performance, greater comfort and safety in the execution of several tasks. It is an interdisciplinary science, which has connections with Design and can contribute to the development of optimized and functional products that are not harmful to human health. Throughout the development of a product, it is necessary to develop studies and tests that can be performed through models, mock-ups and prototypes. These models may be produced with different methods, by handmade techniques or automated and digital processes, such as Rapid Prototyping (RP) technologies, for example. This study aimed to compare two mock-ups of vegetables peelers, which were produced in different ways - one produced with epoxy resin ("Durepoxi"), and another by a subtractive RP technology, using the CNC milling machine Roland MDX 540. For comparative purposes, the price, the production time, the quality and surface finishing, dimensional accuracy and ergonomics were considered as variables. In the end of this study, two distinct models, with advantages and disadvantages in different aspects were obtained, and those production techniques can be combined in order to achieve a more complete and profitable product development process (PDP) as a result.

Keywords Mock-up, Ergonomics, Rapid Prototyping

1. Introdução

Atividades manuais podem causar danos a longo prazo, principalmente se elas são executadas de maneira contínua e inadequada. Segundo PASCHOARELLI et al (2010), o uso de ferramentas manuais mal dimensionadas pode gerar inúmeros tipos de constrangimentos ao usuário, que podem variar desde uma insatisfação e desconforto até patologias graves nas extremidades dos membros superiores. Os problemas mais recorrentes estão relacionados ao dimensionamento, à forma, à estabilidade, ao peso, à textura, entre outros. Um exemplo para o uso de ferramentas é a atividade de descascar alimentos, que é comum no dia a dia de muitas pessoas, seja para o preparo de sua própria refeição ou para fins laborais, como o trabalho de cozinheiras. O descascador de alimentos é um utensílio culinário presente no cotidiano das pessoas, vendido em supermercados e lojas de utilidades domésticas, porém a maioria dos formatos disponíveis possui pouca variação e critérios ergonômicos.

De acordo com PASCHOARELLI et al. (2011), de modo geral, pode-se afirmar que nas fases preliminares do processo de desenvolvimento do produto (PDP), durante o design ergonômico de instrumentos manuais, os sistemas convencionais de confecção de protótipos e *mock-ups* são os mais empregados, e que estes são essenciais para a avaliação e validação ergonômica de um produto ou sistema.

A fim de otimizar seu PDP e aumentar a qualidade e a competitividade, muitas empresas optam por investir em novas tecnologias e testes. De acordo com VOLPATO (2007), o sucesso de um produto está muitas vezes associado à habilidade da empresa em identificar as necessidades dos clientes e imediatamente desenvolver produtos de forma a atendê-las, a um custo competitivo. Para isso, ressalta que a aplicação de uma metodologia de projeto, como a utilização de ferramentas computacionais e representações físicas do produto (tais como maquetes, protótipos e *mock-ups*) é essencial para um PDP bem-sucedido.

Para VOLPATO (2007), o *mock-up* é um modelo físico que imita o produto final, e geralmente é confeccionado em escala natural (1:1). Suas dimensões e forma são similares ao design proposto e não tem custo elevado. Embora tenha as características dimensionais e morfológicas semelhantes ao produto final, o *mock-up* pode ser produzido com materiais diferentes do produto final e sem sistemas funcionais. Portanto, o *mock-up* de um produto pode ser utilizado, pela equipe de projeto, para estudos ergonômicos iniciais e testes simulados, o que possibilita a reavaliação do projeto e otimização do processo de produção, pois através deles podem ser feitos testes, sobretudo ergonômicos. De acordo com PEREIRA (2015), estes podem ser feitos manualmente, através de técnicas tradicionais, com papel, massa, madeira, papel ou através de tecnologias mais elaboradas, como a Prototipagem Rápida (PR).

Este trabalho apresenta a comparação do modelo de dois *mock-ups* de descascadores de alimentos semelhantes, porém produzidos com técnicas diferentes, um de maneira tradicional e manual, através da modelagem de Durepoxi, e outra de maneira automatizada, através da Fresadora CNC Roland MDX 540 com 4º eixo rotacional ZCL 540 - uma tecnologia subtrativa de PR.

2. Prototipagem Rápida

A PR pode ser definida como um processo de fabricação digital através de recursos computacionais. O uso das tecnologias de PR possibilita a produção de peças em três dimensões (modelos, *mock-ups*, protótipos, moldes, etc), e suas estruturas são obtidas através de informações de um modelo geométrico virtual, criado em softwares de modelagem 3D e geradores de arquivos CAD – Desenho Assistido por Computador. Para isso, podem ser utilizadas tanto tecnologias aditivas, baseada na adição de material, camada sobre camada (impressão 3D), como as subtrativas, baseadas na subtração de material a partir de um bloco. No caso das tecnologias subtrativas, a operação pode ser feita por meio de máquinas e equipamentos de usinagem automatizados, operados por CNC (Comando Numérico por Computador).

Segundo VOLPATO (2007), além de acelerar o PDP, possibilitar testes a fim evitar possíveis falhas e facilitar uma melhor comunicação entre os membros do projeto, a PR é capaz de executar geometrias complexas e trabalhar detalhes precisos, inclusive podendo gerar peças prontas para o uso, processo esse conhecido como Manufatura Rápida (MR). Outras vantagens são: redução de material utilizado na confecção da peça, automatização do processo, e o fato de que a PR dispensa o uso de algumas ferramentas e moldes durante o processo de produção. Entretanto, embora, mais recentemente, o custo dos insumos e das máquinas tenha diminuído desde que as primeiras patentes do setor se tornaram de domínio público, além de temas como impressão 3D terem se tornado mais populares, boa parte das tecnologias de PR ainda não são acessíveis a uma boa parte da indústria.

3. Ergonomia

Ergonomia é a ciência responsável pela adequação das condições do trabalho ao trabalhador, e a sua utilização pode lhe proporcionar melhor desempenho, como também maior conforto e segurança na execução da tarefa. De acordo com a International Ergonomics Association (IEA), a Ergonomia é o elo entre o homem, seu ambiente de trabalho e os métodos empregados para a execução das tarefas. Possui como principal objetivo produzir, através das muitas disciplinas que a compõem, conhecimentos que possam beneficiar a interface HOMEM – AMBIENTE DE TRABALHO – TECNOLOGIA – VIDA. Segundo IIDA (2005), a adaptação sempre ocorre do trabalho

para o homem e a recíproca nem sempre é verdadeira, pois é muito mais difícil adaptar o homem ao trabalho. Portanto, isso significa que a Ergonomia parte do conhecimento do homem para fazer o projeto do trabalho, ajustando-o às capacidades e limitações humanas e por ter uma abordagem interdisciplinar, pode ter profissionais de outras áreas, além do designer, relacionados à solução de problemas ergonômicos, como médicos do trabalho, analistas do trabalho, psicólogos, engenheiros e enfermeiros.

"A Ergonomia (ou Fatores Humanos) é uma disciplina científica relacionada ao entendimento das interações entre os seres humanos e outros elementos ou sistemas, e à aplicação de teorias, princípios, dados e métodos a projetos a fim de otimizar o bem estar humano e o desempenho global do sistema. Os ergonômistas contribuem para o planejamento, projeto e a avaliação de tarefas, postos de trabalho, produtos, ambientes e sistemas de modo a torná-los compatíveis com as necessidades, habilidades e limitações das pessoas." ABERGO(2000)

O Design Ergonômico, de acordo com PASCHOARELLI (2003), é a aplicação do conhecimento ergonômico no projeto de dispositivos tecnológicos, com o objetivo de obter produtos e sistemas seguros, confortáveis, eficientes, efetivos e aceitáveis. Para PEREIRA (2015), o Design Ergonômico caracteriza-se pela intervenção ergonômica no âmbito projetual, com a intenção de minimizar os problemas decorrentes do projeto, para proporcionar satisfação, conforto, segurança e desempenho aos usuários. É capaz de auxiliar na prevenção de doenças musculoesqueléticas, como DORT, lesões e dores. As DORTs (Distúrbios Osteomusculares Relacionados ao Trabalho) acometem músculos, nervos e tendões e aparecem através da execução de movimentos reincidentes e contínuos. Muitas destas doenças aparecem em postos de trabalho e pela utilização de ferramentas de trabalho inadequadas.

Diversos fatores a fim de se elaborar projetos que atendam seus objetivos e que não prejudiquem a saúde do homem devem ser levados em conta desde o início da concepção de um produto. Para isso, estudos e testes devem ser feitos. Segundo PEREIRA (2015), os produtos, para serem testados e analisados, precisam ser materializados. Esta materialização pode ser no aspecto físico, através de materiais e técnicas diversos, ou através de aspectos virtuais, por meio de softwares, utilizando modelos tridimensionais virtuais. A elaboração de protótipos permite simular situações de uso com o produto, o que possibilita análises cognitivas e ergonômicas, sem grandes custos e com rapidez.

4. Materiais e Métodos

Dois *mock-ups* de descascadores de alimentos foram escolhidos como os objetos de estudo, um produzido manualmente e outro por uma tecnologia de PR. Utilizou-se como base as etapas metodológicas propostas na disciplina "Ergonomia aplicada ao Design", ministrada por PASCHOARELLI. De forma a encontrar um formato que pudesse atender os requisitos desse projeto, vários sketches de cabos descascadores foram desenvolvidos, selecionando-se o de número 4 para ser reproduzido fisicamente (Figura 1) através do material listado no quadro 1.

Computador desktop com Processador Intel Core2Duo, memória RAM de 4GB e Sistema Operacional de 64 Bits, Windows 7 Home Premium
Fresadora CNC Roland MDX 540 com 4º eixo rotacional ZCL 540
Software SolidWorks 2011
Software Magics 20.03
Software SRP Player 1.23
Bloco de MDF de 202mm x 82mm x 30mm
Fresa esférica ball nose 6mm x 48mm
Papel alumínio
Durepoxi (100g)
Lixas d'água com gramaturas de 100 a 600
Paquímetro digital

Quadro 1. Materiais

Fonte. Elaborado pelo autor, com base na pesquisa realizada.

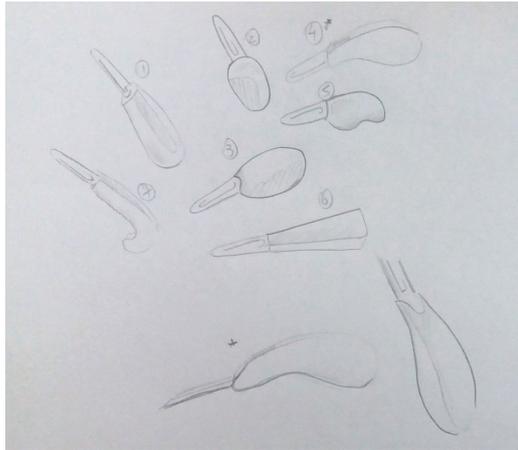


Figura 1. Sketches

A elaboração das formas dos *mock-ups* foi baseada em noções pessoais de conforto, nos trabalhos da disciplina citada anteriormente, como também no trabalho de SALA (2015), “Ergonomia aplicada a ferramentas manuais: o caso da ferramenta manual para descascamento de raízes de mandiocas”, que apresentou um estudo elaborado sobre a atividade de descascar mandiocas e propôs um modeloergonômico.

Iniciou-se a pela confecção da primeira peça por meio de trabalho manual, de modo que viesse a ser utilizada como base para criação do modelo virtual. O material escolhido foi o Durepoxi, utilizando em seu interior, como substrato, papel alumínio amassado, a fim de diminuir o peso final (Figura 2). O tempo de sua modelagem foi de 35 minutos, levando 2 horas e 30 minutos para secar. Uma vez seca, a peça passou por lixamento, de modo a deixar sua superfície lisa e uniforme, levando cerca de 4 horas e 52 minutos, utilizando-se lixas com granas variando de 100 a 600 (Figura 3).



Figura 2. Modelagem com o Durepoxi e miolo de papel alumínio



Figura 3. Lixamento do *mock-up* em Durepoxi

A elaboração da peça virtual fez-se uso de medidas tomadas a partir do modelo em Durepoxi, coletadas por meio de um paquímetro digital, e desenvolvida no software SolidWorks 2011 (Figura 4), levando 25 minutos. Ainda no SolidWorks, foi modelado um volume retangular em torno da peça, que representaria a área utilizada para a produção do *mock-up* e sustentação deste por meio de pontes (Figura 4). Na sequência, o programa Magics 20.03, foi utilizado para avaliar sua a malha

e verificar a ocorrência de problemas em sua estrutura, o que não foi constatado. No Magics 20.03, também foram feitas as pontes de sustentação da peça, e calculado o espaço para o apoio das garras do 4º eixo rotacional da Fresadora CNC Roland MDX 540, uma vez que teria que ser trabalhada em 360° (Figura 5).

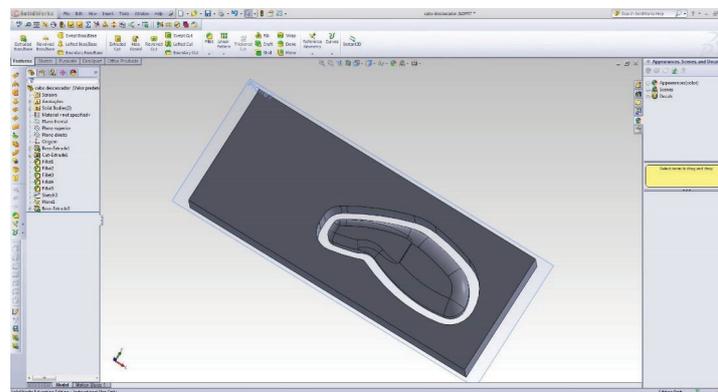


Figura 4. Modelo 3D no Software SolidWorks 2011

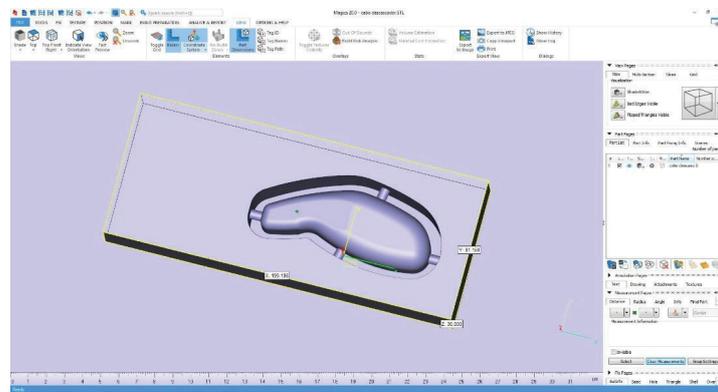


Figura 5. Modelo 3D no Software Magics 20.03

O arquivo CAD gerado no SolidWorks foi então convertido em STL (extensão reconhecida pelas tecnologias de PR e, através do software SRP Player 1.23, foram gerados os parâmetros da usinagem do modelo em questão (Figura 6).

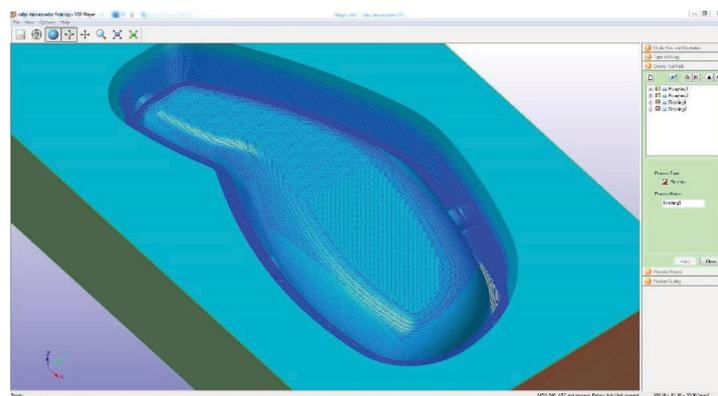


Figura 6. Parâmetros de usinagem no Software SRP Player 1.23

O material escolhido para a execução do modelo foi o MDF – Medium Density Fiberboard, por se tratar de um material barato e fácil de usar. Para a execução deste descascador foi necessária apenas uma fresa esférica (ball nose) com 6mm de diâmetro e 48mm de comprimento, utilizada tanto para a operação de desbaste quanto para a operação de acabamento. (Figura 7). A escolha da máquina MDX 540 se deu por ser não apenas acessível e interativa, mas principalmente por ser capaz de criar peças com dimensões precisas e com acabamento com alta qualidade superficial, além de possuir um 4º eixo rotacional, que permitiu a usinagem da peça em 360°. Esta tecnologia de PR está disponível no CADEP (Centro Avançado de Desenvolvimento de Produtos) – da Unesp de Bauru, onde esta pesquisa foi realizada.

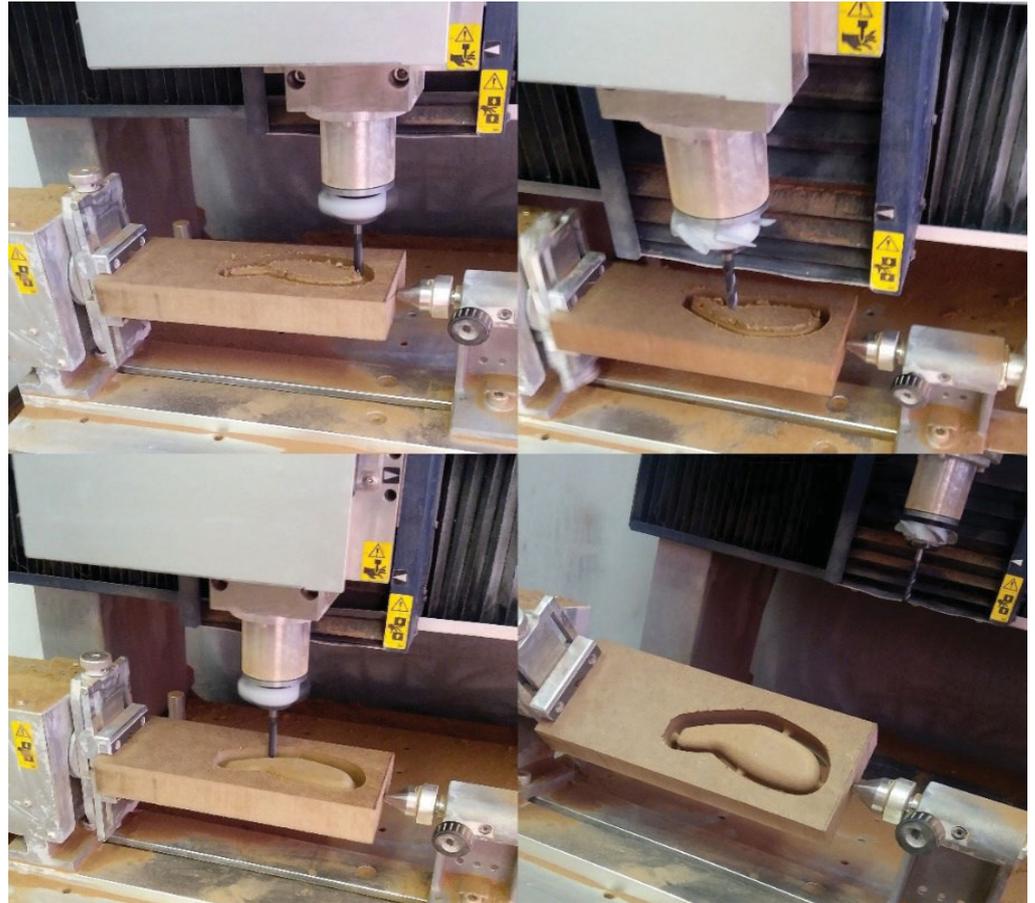


Figura 7. Usinagem na máquina MDX 540

O *mock-up* obtido por esta tecnologia subtrativa de PR levou 43 minutos para ser concluído, sendo sete minutos para a operação de desbaste (4 minutos em um lado e 3 no outro), e 36 minutos para a operação de acabamento (19 minutos em um lado e 17 no outro). Este modelo precisou ser removido do suporte, o que foi feito por meio de uma lâmina de serra, e em seguida foi lixado apenas nas áreas onde as pontes de ligação ao suporte estavam. O processo de remoção de suportes, bem como o lixamento, demorou 28 minutos. (Figura 8)



Figura 8. Remoção das pontes de usinagem



Figura 9. Mock-ups

5. Resultados e Considerações Finais

Neste estudo foram analisadas as vantagens e desvantagens da utilização da PR e da modelagem tradicional na criação de *mock-ups* para a avaliação ergonômica, que é essencial ao PDP, através de um estudo de caso.

Como vantagens da produção manual, pode-se colocar o custo como sendo a principal, tendo sido o valor dos gastos cerca de 7% do necessário para ser produzido por meio da Prototipagem Rápida. Ou seja, o modelo produzido manualmente ficou cerca de 14 vezes mais barato. As vantagens da obtenção do *mock-up* por Prototipagem Rápida estão vinculadas, principalmente, ao seu tempo de produção, sendo que através da PR utilizou-se somente 20% do tempo gasto em relação a quando se fez manualmente, sendo esse tempo de 96 min ou 1h36 min contra 477min ou 7h57min, respectivamente.

A respeito da qualidade de acabamento, o modelo produzido em PR se destacou, pois a superfície ficou lisa e regular, além de apresentar superioridade no quesito precisão dimensional, diferentemente do mock-up produzido manualmente. O quadro 2 apresenta os principais dados obtidos.

	Produzido manualmente	Produzido por PR
Tempo de produção	Produção: 35 minutos Pós-processamento: 2 horas e 30 minutos (secagem) + 4 horas e 52 minutos (lixamento) Total: 477min ou 7h57min	Produção: 25 minutos (modelagem 3D) + 7 minutos (desbaste) + 36 minutos (acabamento) Pós-processamento: 28 minutos (remoção das pontes e lixamento) Total: 96min ou 1h36min
Custo	R\$7,85	R\$110,00
Material	- Durepoxi e papel alumínio - O Durepoxi é um material barato, versátil, fácil de trabalhar e é de fácil acesso, podendo ser comprado em supermercados. - Para um melhor aproveitamento de material e redução do peso da peça, optou-se pelo uso de papel alumínio no interior da peça, como substrato.	- MDF - É um material barato e fácil de ser trabalhado. - Não é recomendado o contato com água e umidade. - Embora a tecnologia subtrativa possa utilizar diversos tipos de materiais, como plásticos, metais, madeira, na produção de peças, o MDF foi escolhido por ser, barato, fácil de conseguir, e fácil de usinar.
Pós processamento e acabamento	- Lixamento do <i>mock-up</i> a fim de corrigir defeitos superficiais, eliminar ondulações para deixar a superfície regular e uniforme. Porém, o acabamento não ficou 100% liso.	- Remoção da ponte criada como suporte à usinagem. - O <i>mock-up</i> já saiu da máquina pronto, e sem a necessidade de lixamento, exceto nas áreas de contato com as pontes.

Quadro 2. Comparação entre o mock-up produzido manualmente e o mock-up produzido por PR

Fonte. Elaborado pelo autor, com base na pesquisa realizada.

Uma vantagem de se produzir um objeto ou *mock-up* manualmente é a possibilidade dele ser experimentado durante o processo de sua modelagem, o que reflete diretamente em seus aspectos ergonômicos. Já a peça virtual, embora tenha sido desenvolvida com as mesmas medidas, comparativamente, não apresentou as mesmas qualidades neste quesito em relação a outra, pois existirá sempre a dificuldade de avaliar essa questão quando se trata de um modelo não tangível. A modelagem é um processo importante no PDP, principalmente para avaliar a empunhadura de objetos manuais, a fim de se evitar problemas ergonômicos. Para solucionar estes problemas, e assim otimizar o PDP, propõe-se combinar as duas formas de produção de *mock-ups*. Essa combinação de técnicas pode ser conseguida através da elaboração de *mock-ups* através de técnicas convencionais nas primeiras fases do PDP, pois há a vantagem de testar a Ergonomia do produto com um custo baixo, e posteriormente, nas fases finais, reproduzir a peça através das tecnologias de PR, com melhor qualidade de acabamento. Isso possibilitaria, inclusive, abrir a possibilidade da peça ser reproduzida em maiores quantidades e já prontas para o uso (MR), na produção de um lote piloto, por exemplo.

Para que isso seja possível, sugere-se digitalizar a peça através de um scanner tridimensional. Esta digitalização produz uma malha, que pode ser editada em programas de modelagem 3D e depois reproduzida através de máquinas de PR, tanto aditivas quanto subtrativas. Este estudo, resultado da avaliação de dois *mock-ups* produzidos de maneiras distintas, mostrou vantagens e desvantagens em diferentes aspectos. Podemos concluir que a escolha do tipo de *mock-up* para um projeto deve levar em conta sua aplicação (necessidade), o tempo e a verba disponíveis. Uma outra solução, para um resultado mais satisfatório, é utilizar ambos os processos de produção de *mock-ups*, como complementares.

Referências Bibliográficas

- ABERGO: Associação Brasileira de Ergonomia. [S.l.: s. n.], 2016. Disponível em: <<http://www.abergo.org.br/>>. Acesso em: 02 jun. 2016.
- ALENCAR, F.; RODRIGUES, O.V.; BARATA T. Q. F.; BARTOLO, P. J. *Comparative analysis of dimensional deviations between CAD model and physical models obtained by additive manufacturing technologies by means of optical scanning with structural light projection*. In: *5th International PMI Conference Proceedings*. Ghent: University College Ghent, 2012. V. 1, P. 82 – 85.
- IIDA, I. *Ergonomia: Projeto e Produção*. 2. ed. rev. e amp. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

- JUNIOR, A. S. *Análise comparativa entre os processos de prototipagem rápida na concepção de novos produtos: um estudo de caso para determinação do processo mais indicado*. Diss. Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2008. Acesso em: 02 jun. 2016.
- JUNIOR, O. C.; JUNIOR, A. S.; NETO, A. I. *Processos de Prototipagem Rápida por deposição ou remoção de material na concepção de novos produtos-uma abordagem comparativa*. XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Foz do Iguaçu, 2007. Acesso em: 02 jun. 2016.
- PASCHOARELLI, L. C. *Usabilidade aplicada ao design ergonômico de transdutores de ultra-sonografia: uma proposta metodológica para avaliação e análise do produto*. São Carlos: UFSCar, 2003.
- PASCHOARELLI, L. C. et al. *Antropometria da Mão Humana Influência do Gênero no Design Ergonômico*. Ação Ergonômica, revista da associação Brasileira de Ergonomia, v. 5, n. 2, 2010.
- PASCHOARELLI, L. C.; SILVA, D. C.; SILVA, J. C. P. *Metodologia de Design de Instrumentos Manuais: Mock-Ups e Protótipos na Avaliação Ergonômica*. In: *O uso da modelagem aplicada à ergonomia no desenvolvimento de produtos 174 Metodologia em design : inter-relacoes / orgs. Marizilda dos Santos Menezes, Luis Carlos Paschoarelli, Mônica Moura*. - São Paulo : Estação das Letras e Cores, 2011.
- PEREIRA, D. D. *O uso da modelagem aplicada à ergonomia no desenvolvimento de produtos*. Brasil: UNESP Bauru, 2015. Disponível na internet por http em: < <http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/132512/000853590.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 09 mai. 2016.
- RODRIGUES, O. V.; ALENCAR, F.; BARATA T. Q. F. *Combining Rapid Prototyping with more conventional production processes*. In: *5th International PMI Conference Proceedings*. Ghent: University College Ghent, 2012. V. 1, P. 147 – 150.
- SALA, S. M. F. *Ergonomia aplicada a ferramentas manuais: o caso da ferramenta manual para descascamento de raízes de mandiocas*. Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.
- VASCONCELOS, P.; LINO, F. J. & NETO, R. J. *O fabrico rápido de ferramentas ao serviço da engenharia concorrente*. Portugal: TECNOMETAL, 2001. Disponível na internet por <http em: <<http://paginas.fe.up.pt/~falves/arttecnometal.pdf>>. Acesso em: 10 mai. 2016.
- VOLPATO, N. *Prototipagem Rápida: tecnologias e aplicações*. São Paulo: Editora Blücher, 2007.

Agradecimentos

Ao CADEP/UNESP (Centro Avançado de Desenvolvimento de Produtos) e seus bolsistas, e à CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo suporte nesta pesquisa.

