

FABRICAÇÃO DE PROTÓTIPOS PARA TESTES EXPERIMENTAIS

Filipe Wiltgen – Universidade de Taubaté
E-mail: LFWBarbosa@gmail.com ou Filipe.Wiltgen@unitau.br

Resumo: Os protótipos são parte fundamental de qualquer desenvolvimento. Existem muitas formas de realizar um teste para um ensaio. Alguns ensaios possuem diversos testes em seus procedimentos. Sem Ensaio & Testes uma nova ideia não avança em sua maturidade tecnológica (TRL - Technology Readiness Level), e dessa forma, alonga o caminho de virar um produto. A indústria realiza testes, mas eles quase sempre são com o produto e não com os protótipos reais. Seja como for, a limitação imposta pela programação computacional de protótipos virtuais ou digitais, nunca alcança os resultados obtidos com um protótipo físico real, quer seja em ambiente controlado (em laboratório), ou mesmo em ambiente relevante (em campo). Atualmente com a manufatura aditiva a tarefa de construção de protótipos físicos alcançou outro nível de realização. Um protótipo físico real de desenvolvimento deve sempre ser fácil e rápido na construção, em diferentes escalas e com materiais de baixo custo. Conforme a maturidade do projeto cresce, aumentam também, os custos e escalas dos protótipos. Este artigo tem o objetivo de discutir e apresentar, de forma clara e simples, a importância da construção e testes de novas ideias com protótipos físicos reais fabricados em manufatura aditiva.

Palavras-chave: Protótipos, Testes & Ensaio, Manufatura Aditiva, Maturidade Tecnológica, Requisitos.

MANUFACTURE OF PROTOTYPES FOR EXPERIMENTAL TESTS

Abstract: Prototypes are a fundamental part of any development. There are many ways to perform a test for an essay. Some assays have several tests in their procedures. Without Trials & Tests, a new idea does not advance in its technological maturity (TRL - Technology Readiness Level), and thus lengthens the path to becoming a product. The industry carries out tests, but they are almost always with product and not with real prototypes. Be that as it may, limitation imposed by computational programming of virtual or digital prototypes never achieves results obtained with a real physical prototype, whether in a controlled environment (in the laboratory), or even in a relevant environment (in the field). Currently, with additive manufacturing, task of building physical prototypes has reached another level of achievement. A real physical prototype development should always be easy and quick to build, at different scales and with low cost materials. As project maturity grows, so do costs and scale of prototypes. This paper aims to discuss and present, in a clear and simple way, importance of building and testing new ideas with real physical prototypes manufactured in additive manufacturing.

Keywords: Prototypes, Tests & Trials, Additive Manufacturing, Technological Maturity, Requirements.

1. Introdução

A evolução científica e tecnológica quase sempre demora para ser incorporada e transmitida como conhecimento para o setor produtivo da sociedade, quer seja pela latência inerente de dois mundos intrinsecamente destinados pelos objetivos naturais, quer seja pela inércia de ambos em estreitar a distância entendendo as necessidades e as características diferentes e peculiares de cada um destes mundos, científico e industrial.

Seja como for, a evolução humana precisa da participação efetiva desses dois distintos mundos atuando juntamente. O interessante é que ambos se beneficiam desta aproximação. A indústria com a modernização tecnológica e implementação da ciência em seus processos, o que aumenta a produtividade diminuindo os custos e prazos de fabricação, que consequentemente levam ao aumento dos lucros. E os pesquisadores e acadêmicos que podem investigar novos problemas, ajudar no desenvolvimento

industrial e da sociedade, além de serem financiados para realizar ciência aplicada em tecnologia.

Uma importante ação de estreitamento entre o mundo industrial e o científico (Wiltgen, 2020B; Elverum *et al.*, 2016) é a condução e realização de testes e ensaios (Wiltgen, 2020A; Anderl *et al.*, 2007; Ribeiro e Wiltgen, 2021) utilizando protótipos físicos reais (Wiltgen, 2019) fabricados via a manufatura aditiva (Alcalde e Wiltgen, 2018; Gomes e Wiltgen, 2020).

A condução de testes e ensaios com protótipos evoluiu junto com a evolução computacional, a qual permitiu a utilização de computadores para executar simulações computacionais, ou testes virtuais, os quais ajudam a encurtar o caminho de um desenvolvimento, mesmo com as limitações impostas pelo ambiente computacional.

É claro que os testes analíticos (virtuais), ou simulações computacionais, principalmente nos estágios iniciais de um desenvolvimento, quase sempre são chamados de protótipos virtuais, ou seja, com um modelo digital desenhado em CAD em 2D ou em 3D no qual podem ser executados testes preliminares a respeito das características funcionais e materiais de um determinado objeto de estudo para manufatura (Canciglieri *et al.*, 2015; Crump, 1992; Guo *et al.*, 2013; Drezner, 1992; Smith *et al.*, 1981; Houde e Hill, 1997; Wohlers, 2001; Borowski, 2012; Dahan e Mendelson, 2001).

No decorrer desse artigo, serão apresentadas questões relativas a importância de se contruir protótipos para testes e como isso influenciar positivamente na maturidade e na evolução do desenvolvimento de novas ideias e produtos.

A utilização de protótipos na indústria sem dúvida acarreta benefícios econômicos, que são traduzidos em menores custos e prazos, tornando mais competitivo o setor de manufatura que faz o uso de protótipos como algo rotineiro de seu processo de desenvolvimento, principalmente os setores que fazem uso da manufatura aditiva (Hwang *et al.*, 2020).

A importância e a versatilidade de utilizar a manufatura aditiva e seus diversos tipos de materiais e técnicas (Wall *et al.*, 1992; Jiménez *et al.*, 2007; Vasconcelos *et al.*, 2001; Alcalde e Wiltgen, 2018), permite avançar a cada nova etapa de maturidade tecnológica alcançada pelo produto. Efetivando os testes e obtendo os resultados esperados nas fases de desenvolvimento, e assim, realimentar velozmente a cadeia de processos de engenharia na qual tem como consequência factível a redução significativa para o lançamento de uma nova ideia.

Por fim, tem-se uma breve discussão e conclusão a respeito do que esperar para o futuro na utilização de protótipos na academia e na indústria, e a necessidade natural do profundo e benéfico estreitamento entre ambos.

2. Desenvolvimento através de Testes utilizando Protótipos

Os protótipos quase sempre relacionados ao processo de prototipagem rápida, na verdade surgiram da necessidade de construir um objeto de forma rápida e que pude-se ser testado em seus limites operacionais e funcionais. De tal maneira que sua possível, e quase sempre inevitável, falha catastrófica fosse um impedimento econômico e financeiro.

Assim, um objeto que construído com a finalidade de ser testado, pode ser construído como o produto final (o próprio produto), ou como um produto em desenvolvimento (um protótipo do produto). Fica clara a distinção entre ambos, pois o próprio produto

possui custo, prazo, tamanho e material de fabricação idêntico a do produto final (Kruth *et al.*, 1991; Nishimura *et al.*, 2016; Smith e Reinertsen, 1997; Rao *et al.*, 2003). Desta forma, testes iniciais de adequação do desenvolvimento seriam sem dúvida alguma impeditivos para uma grande gama de empresas e indústrias.

Em contra partida, testes iniciais realizados com protótipos de produtos (Budde *et al.*, 1992; Buchenau e Suri, 2000; Camburn *et al.*, 2017; Hall, 2001), possuem vantagens intrínsecas as técnicas progressivas de desenvolvimento e de adequação de material, tanto em volume, quanto e em custo. A construção em escalas reduzidas, permite realizar muitos testes importantes e que não precisam de muita matéria-prima, se quer a mesma do produto final e permite construções rápidas e de baixo custo. O que não impede, e até justifica a cada nova etapa, aumentar a escala, a quantidade e o tipo de matéria-prima de maior custo, progressivamente mais próximas da utilizada no objeto a ser um produto final.

O fato de que um protótipo pode ser destruído e descartado, e isso não ser considerado um problema é que sua finalidade é exatamente esta, proporcionar o desenvolvimento progressivo de um nova ideia. Testar ideias é o que proporciona inovações. A final existe uma máxima que diz: “Tudo que existe pode sempre ser melhorado!”.

Os testes em protótipos (Houde e Hill, 1997; Lino e Neto, 2000; Hoss, 2014; Jensen *et al.*, 2018) permitem investigar mudanças que possam ser necessárias nos novos produtos, e que nessas fases podem impactar pouco nos riscos, nos custos e nos prazos. Investir parte do desenvolvimento de uma ideia nova em testes com protótipos são uma maneira inteligente de progredir com eficiência operacional para um lançamento eficaz de um novo produto.

O processo de realimentação entre os desenhos de projeto em modelos digitais CAD e os testes físicos reais em protótipos é o que permite a evolução no desenvolvimento. As modificações dos desenhos técnicos passam a fazer parte da rotina de testes e tendem a acompanhar os resultados obtidos com os testes. Assim, os novos desenhos técnicos melhorados pelas análises dos testes permitem a engenharia acelerar a forma de manufatura. Obtendo significativas mudanças na fabricação, na substituição ou obsolescência de partes e componentes, e ainda, acelerando os processos de montagem, verificação de funcionamento e qualidade final de um novo produto.

Pequenas modificações em projetos permitem grandes economias em tempo e custo, causando grandes impactos no lançamento de novos produtos.

Testes com protótipos devem sempre acompanhar um procedimento de desenvolvimento progressivo bem estruturado e baseado em requisitos bem escritos conforme as orientações de Engenharia de Sistemas & Requisitos (ESR), no qual as interações Projeto-Protótipo-Teste-Resultado possam sempre conduzir a modificações de projetos e desenhos que possam estabelecer novos patamares de desenvolvimento.

Essas etapas alcançadas com os testes em protótipos impactam diretamente na maturidade tecnológica de uma ideia. A maturidade tecnológica, ou TRL (*Technology Readiness Level*), surgiu da necessidade de construir, projetar e testar equipamentos que nunca haviam sido fabricados antes no qual o ambiente operacional era absolutamente inóspito e muito perigoso a vida. Além disso, os materiais, os equipamentos, os profissionais e os locais de desenvolvimento e testes possuíam elevado custo, e que poderiam facilmente serem impeditivos utilizando as técnicas e processos convencionais de manufatura existentes na década de 1960 (Blanchard e Fabrycky,

2011; Wiltgen, 2020A; Fabrycky, 2010; Rodrigues *et al.*, 2012; Comenale e Wiltgen, 2021; Wiltgen, 2021;Ribeiro e Wiltgen, 2022).

Essas novas ideias surgidas na NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) para projetar e construir equipamentos, sistemas e peças, viabilizou a evolução do setor produtivo e permitiu a engenharia evoluir na forma de consuzir os avanços de um determinado produto baseado na realização de ensaios e testes contínuos de desenvolvimento centrados nos resultados e nas análises dos testes que conduzem a mudanças progressivas nas etapas de maturidade tecnológica, e assim, alcançando elevados níveis de TRL dos produtos (Jones, 2007; Fabrycky, 2010).

A história do desenvolvimento tecnológico voltado para aplicação na indústria sempre limitou a utilização de protótipos em testes aplicados as novas ideias e produtos dado aos custos operacionais que envolvem além da fabricação dos protótipos, laboratórios de testes e profissionais capacitados na realização de testes (Otto e Wood, 1998; Ulrich e Eppinger, 2000; Ullman, 2002; Wohlers, 2001; Borowski, 2012; Drezner, 1992).

Foi com as mudanças nas formas de manufaturar objetos, e a utilização da computação aplicada diretamente na fabricação de peças que os protótipos começaram a ficar viáveis. A fabricação de objetos utilizando a computação implementada em máquinas do tipo CNC (Comando Numérico Computadorizado) aplicadas em dispositivos tradicionais de manufatura subtrativa fez com que a mão de obra capacitada fosse transferida dos humanos para as máquinas na forma de uma programação. Isso proporcionou uma drástica mudança na fabricação até os dias de hoje.

O processo de desenho técnico baseado em computadores como CAD/CAE (Desenho Assistido por Computador e Engenharia Auxiliada por Computador) proporcionaram o início da popularização de projetos digitais via modelos bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D). Que com o tempo podiam ser traduzidos diretamente em códigos computacionais (programas) e fabricados em máquinas do tipo CNC.

Na Figura 1 pode ser observado a sequência de desenvolvimento baseado em testes com protótipos físicos reais, desde seus requisitos até os níveis de maturidade tecnológica (TRL) alcançados.

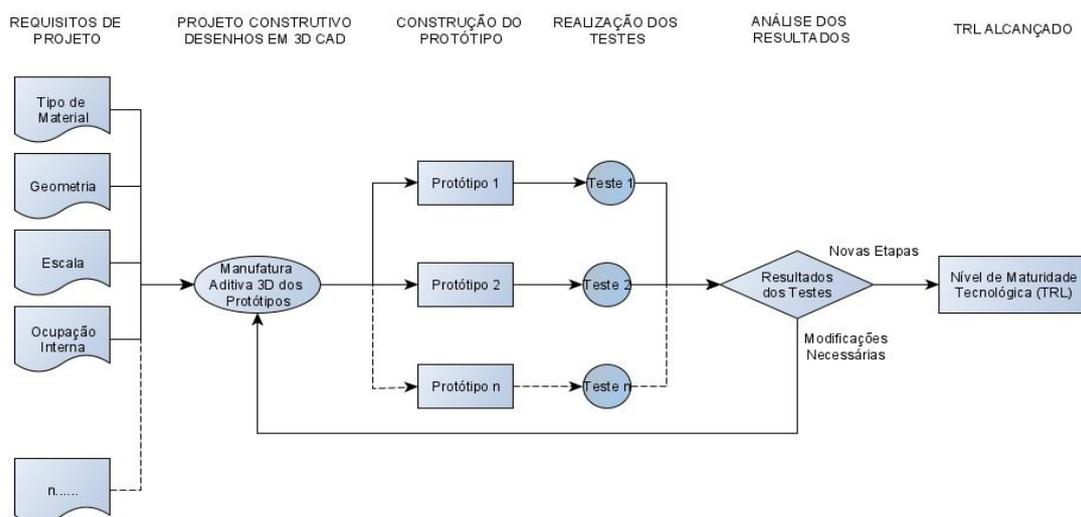


Figura 1 – Processo de desenvolvimento de produtos com testes em protótipos.

Fonte: Próprio Autor.

Na verdade a sequência apresentada na Figura 1 é a fusão de duas técnicas de processo de desenvolvimento de produtos consagrados nas referências (Otto e Wood, 1998; Ullman, 2002; Ulrich e Eppinger, 2000) que sempre são apresentados separadamente em três tipos: o “Processo Genérico de Desenvolvimento de Produtos”, cujas ações são sempre sequenciais; o “Processo Espiral de Desenvolvimento de Produtos”, no qual existe a realimentação do projeto após os testes; e o “Processo de Sistema Complexo de Desenvolvimento de Produtos”, sendo que nesse são realizados diversos teste e projetos com integração dos resultados. A sequência aqui apresentada na Figura 1 é uma nova evolução destas técnicas, pois junta o Processo em Espiral com o Processo de Sistemas Complexos, ou seja, como pode ser visto anteriormente, são realizados múltiplos testes com múltiplos protótipos com realimentação dos projetos a integração dos resultados para prosseguir em nova etapa, obtendo o “Processo Espiral Complexo de Desenvolvimento de Produtos”.

Por definição um "protótipo" é um objeto de teste projetado para demonstrar e testar possíveis riscos técnicos que devem ser avaliados e são essenciais para o sucesso de um sistema, pois ajudam a resolver problemas. Um protótipo não precisa ser um sistema completo, mas deve conter informações em escopo e escala, sendo capaz de ser adaptado para acomodar uma série de decisões que podem representar um conceito, subsistema ou item de acordo com as decisões a serem tomadas. Em vez de refletir o projeto final (produto), os protótipos são construídos com a expectativa de que, conforme as decisões são tomadas e as mudanças ocorram de forma progressiva nos projetos esses possam a cada etapa refletir melhor como será o projeto final (Drezner, 1992; Borowski, 2012; Otto e Wood, 1998; Ullman, 2002; Ulrich e Eppinger, 2000; Rosochowski e Matuszak, 2000; Nevins e Whitney, 1989; Myers e Norton, 1998).

De forma similar, a “prototipagem” é a prática de testar protótipos, em escopo e escala apropriados, com a finalidade de obter conhecimento sobre algum requisito, capacidade ou funcionalidade de um projeto. O conhecimento obtido com a prototipagem informa uma tomada de decisão no processo cuja saída resulta em algum grau de mudança. O grau de mudança permitida é limitado, e deve atender ao escopo do resultado e da referida escala do protótipo (Wiltgen, 2019; Alcalde e Wiltgen, 2018; Drezner, 1992; Borowski, 2012; Otto e Wood, 1998; Ullman, 2002; Ulrich e Eppinger, 2000; Michaelraj, 2009).

Os protótipos podem ser classificados em duas dimensões (material e funcional). A primeira dimensão é o grau material de um protótipo, que pode ser de dois tipos, físico (concreto) ou analítico (abstrato). A segunda dimensão é o grau funcional de um protótipo, que pode ser de dois tipos, do tipo amplo (abrangente) ou do tipo restrito (limitado) (Drezner, 1992; Borowski, 2012).

Os “protótipos físicos” são artefatos tangíveis criados para aproximar o projeto ao produto. Aspectos do produto de interesse para a equipe de desenvolvimento são fisicamente construídos em um artefato para teste e experimentação. Exemplos de protótipos físicos incluem modelos que se parecem com o produto, protótipos de prova de conceito são usados para testar uma ideia rapidamente e validar a funcionalidade de um produto (Wiltgen, 2019).

Os “protótipos analíticos” representam o produto em um maneira não tangível, geralmente matemática ou visual na forma de um modelo computacional. Aspectos interessantes do produto podem ser previamente analisados, em vez de construídos. Exemplos de protótipos analíticos incluem simulações de computador, sistemas de

equações codificados em forma de modelos de computador em geometria tridimensional.

Os “protótipos amplos” implementam a maioria, senão todos, os atributos (requisitos) de um projeto para o desenvolvimento de um produto. Um protótipo amplo é uma versão em escala real e totalmente operacional do produto. Um exemplo de um protótipo amplo é um objeto fornecido aos clientes a fim de identificar qualquer problema remanescente que podem levar a uma falha, isso permite mudanças e melhorias antes de comprometer a produção.

Em contraste aos protótipos amplos, os “protótipos restritos” implementam um ou alguns dos atributos (requisitos) de um projeto para um produto. Exemplos de protótipos restritos incluem modelos com outros tipos de material para explorar a geometria de um produto, e podem ser construídos de forma simples para investigar o desempenho de um produto. Testes em protótipos enfatizam os aspectos importantes da prototipagem no processo de tomada de decisão como uma alternativa econômica confiável (Wall *et al.*, 1992; Wiltgen, 2019; Wiltgen, 2022).

Para realizar os testes com protótipos em sistemas (simples ou complexos) é sempre necessário ser metódico e exaustivo com os requisitos, sequências de procedimentos e verificação para que as análises dos limites operacionais (panes e falhas) sejam bem documentadas a fim de permitir a engenharia executar as modificações solicitadas.

De forma similar, os procedimentos de ensaios e testes devem ser completos e descrever em detalhes os requisitos de cada teste a ser realizado, em sua forma, sequência, montagens (equipamentos e dispositivos necessários para os experimentos), e também, como serão coletados os dados obtidos nos testes para análise detalhada dos resultados encontrados em cada teste.

O procedimento de teste deve ser conduzido de forma a atender um projeto do componente (micro) ao sistema (macro) e diferenciando os Ensaios e Testes em Ambiente Controlado (*DT&E – Developmental Test and Evaluation*), ou seja, aqueles realizados em laboratório dos outros Ensaios e Testes em Ambiente Relevante (*DOT&E – Developmental Operational Test and Evaluation*), ou seja, aqueles realizados em campo. Assim como, o plano de Pesquisa, Desenvolvimento, Teste e Avaliação (*RDT&E – Research, Development, Test & Evaluation*) permitem contemplar e agrupar o *DT&E* e o *DOT&E* em um documento amplo do programa de ensaios e testes (Wiltgen, 2021; Wiltgen, 2020A; Borowski, 2012; Drezner, 1992; Abernathy, 1968; Smith *et al.*, 1981; Tahera *et al.*, 2017; Blanchard e Fabrycky, 2011).

Seja no ambiente que for, laboratório ou em campo, os ensaios e testes devem sempre serem conduzidos de forma individual e depois integrado passo-a-passo em partes para permitir investigar o funcionamento progressivo dos subsistemas até o sistema completo, ou seja, a integração completa. É muito comum realizar testes individuais em componentes durante os ensaios e testes em ambiente controlado de laboratório, e aos poucos integrar os componentes no sistema. Após a realização das análises de funcionamento e respondendo da forma como descrito no documento de procedimento, passar para a próxima fase de testes (Jang e Schunn, 2012; Pineda e Kilicay-Ergin, 2010).

Existe uma evolução na taxonomia de testes de protótipos físicos reais (Otto e Wood, 1998; Ullman, 2002; Ulrich e Eppinger, 2000; Michaelraj, 2009) no qual são avaliados inicialmente em seis classificações de alto nível possibilitando sobreposição de materiais e processos de produção (de protótipos para *Design of Experiments* (DoE),

tipo alfa, tipo beta até a pré-produção) voltados basicamente para a prova de conceito (Otto e Wood, 1998). Classificação com base na finalidade do protótipo, generalizando os protótipos para quatro categorias diferentes que levam à sobreposição entre classificações de um protótipo (Ullman, 2002). Por fim, os protótipos físicos são classificados em dois grupos (duas dimensões) no qual a sobreposição é maior do que as classificações anteriores (Ulrich e Eppinger, 2000).

Na Figura 2 é possível notar a estrutura de cada uma destas taxonomias relativas a validação de testes com protótipos físicos reais.

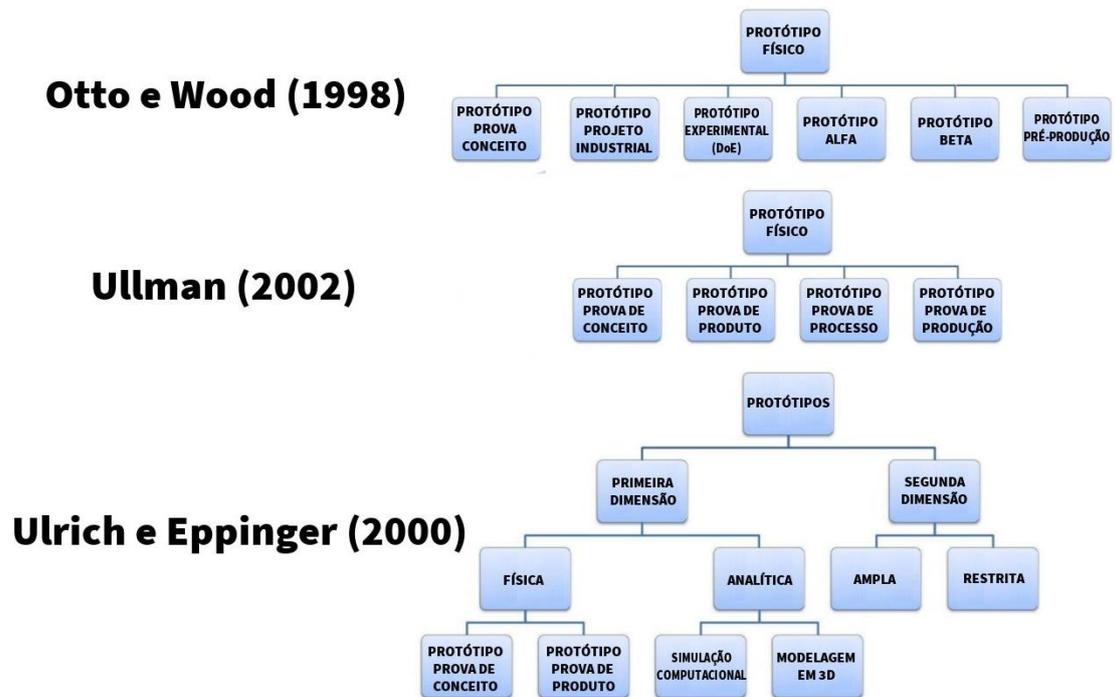


Figura 2 – Taxonomia de testes com protótipos físicos reais.
 Fonte: Adaptado de Michaelraj (2009).

Na Figura 3 é possível ver uma taxonomia da prototipagem relativo aos riscos no qual as incertezas inerentes a um projeto ou uma ideia nova são as ações motivadoras de testes. Observe que todas as incertezas precisam ser testadas e resolvidas com a finalidade de concluir os resultados com êxito e assim reduzir os riscos do projeto.

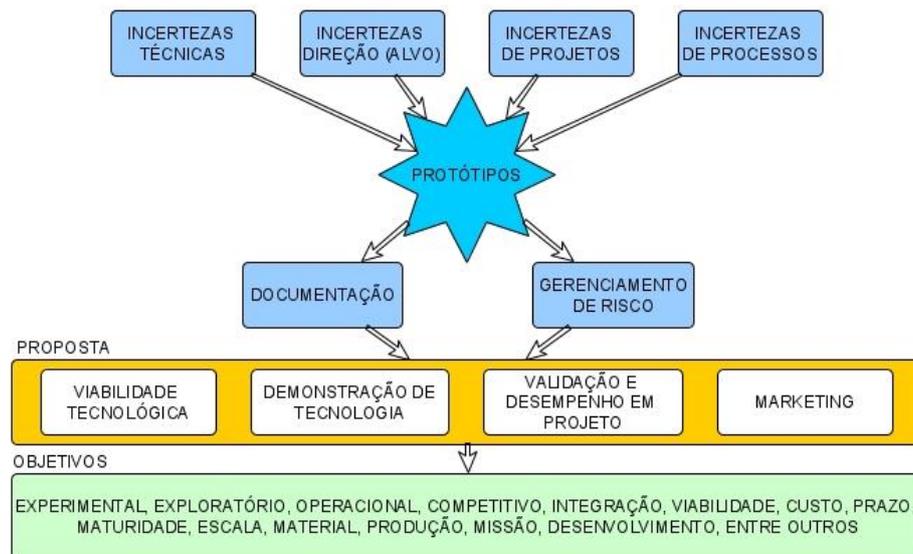


Figura 3 – Taxonomia de riscos e incertezas em protótipos.

Fonte: Adaptado de Drezner (1992) e Smith *et al.* (1981).

Os protótipos (cor azul claro na Figura 3) em escala real (FSD – *Full Scale Development*) reduzem a incerteza tecnológica a respeito do desempenho (cor azul escuro na Figura 3), ou seja, sempre reduzem o risco (Dahan e Mendelson, 2001; Nevins e Whitney, 1989; Ulrich e Eppinger, 2000).

A taxonomia dos protótipos é um tipo de classificação baseada nas estratégias e nas características do uso de um protótipo (Otto e Wood, 1998; Ulrich e Eppinger, 2000; Ullman, 2002; Lim *et al.*, 2008; Michaelraj, 2009; Petrakis *et al.*, 2019; Jeffrey, 2020). As categorias de protótipos estão relacionadas com o estágio de desenvolvimento vinculadas ao grau de maturidade tecnológica (objetivos cor verde na Figura 3) e a redução das incertezas (proposta na cor laranja Figura 3) de um determinado objeto de estudo. Basicamente se dividem em três objetivos distintos: Aumento da Eficiência, Melhoria na Qualidade e Minimização das Incertezas (Drezner, 1992; Smith *et al.*, 1981).

3. Protótipos Físicos Reais e Funcionais

A ampla utilização da manufatura aditiva viabilizou a realização de testes com protótipos de forma efetiva, tendo em vista que seus baixos custos aliados a sua grande diversidade de projetos, materiais e máquinas permite que uma micro empresa ou mesmo uma *StartUp* consiga fazer uso de processos com diretrizes de Engenharia de Sistemas & Requisitos (ESR) seguindo as técnicas de análise de projetos como os modelos em V (técnica de ESR baseada no Domínio do Problema – lado esquerdo do V (Requisitos) para obter possíveis soluções técnicas no Domínio da Solução – lado direito do V (Testes e TRL)) para alcançar a maturidade tecnológica de seus produtos e invenções. Permitindo um desenvolvimento progressivo, conciso e pragmático cientificamente, e assim, obter a oportunidade de disputar mercado com grades empresas, que devido a sua enorme hierarquização letárgica, que não conseguem agir na velocidade tecnológica necessária do mundo moderno (Wiltgen, 2019; Wiltgen, 2020B; Wiltgen, 2021).

A construção de protótipos funcionais com as características idênticas a da peça original é parte fundamental do desenvolvimento de novos produtos (Abernathy e Rosenbloom, 1968; Wiltgen, 2019).

Protótipos podem ser definidos como “uma aproximação do produto ao longo de um ou mais dimensões de interesse” (Drezner, 1992; Borowski, 2012; Smith *et al.*, 1981). Sob esta definição, qualquer entidade exibindo pelo menos um aspecto do produto que é de interesse da equipe de desenvolvimento pode ser visto como um protótipo. Isso inclui diversas formas de protótipos, como esboços de conceitos, modelos matemáticos, simulações computacionais, componentes de teste, e versões de pré-produção totalmente funcionais do produto. A prototipagem é o processo de desenvolver tal aproximação do produto (Budde *et al.*, 1992; Loch *et al.*, 2001; Dahan, 2001; Wall *et al.*, 1992).

Na manufatura aditiva construir objetos personalizados é algo rotineiro, assim sendo, as adaptações necessárias de materiais, escalas, densidade, massa, ocupação interna e rigidez podem ser alterados conforme a necessidade dos testes a serem realizados com os protótipos (Wiltgen, 2019; Alcalde e Wiltgen, 2018; Jiménez *et al.*, 2019; Guo *et al.*, 2013; Gomes e Wiltgen, 2020; Nishimura *et al.*, 2016).

A utilização da manufatura aditiva no contexto de testes com protótipos devem ser realizadas conforme as etapas de execução de projetos seguindo o que a ESR recomenda. Devem ser planejados os testes e os protótipos a serem fabricados em cada etapa de maturidade tecnológica.

Na Figura 4 pode ser observado um diagrama de ESR baseado no modelo em V, mostrando cada etapa de desenvolvimento para cada tipo de relatório apresentando. Nesses relatórios são divulgadas as análises de testes, e os níveis de maturidade tecnológica (TRL) esperados e os efetivamente alcançados.



Figura 4 – Etapas de evolução de projetos em Engenharia de Sistemas & Requisitos.

Fonte: Próprio Autor.

A importância ímpar da manufatura avançada na construção de protótipos físicos reais é inquestionável. A possibilidade de construir protótipos em diversas escalas, materiais, geometrias e densidades (massa) permite uma variedade de opções para a engenharia obter soluções para as mais diversas incertezas durante a evolução do projeto de um novo produto, e amplia significativamente a confiança no êxito do projeto.

4. Importância de Protótipos no Desenvolvimento de Novos Produtos

O ser humano precisa de interação visual e manual táctil, são nossos sentidos naturais que permitem avaliar de forma coerente dispositivos, equipamentos, peças e objetos. Isso permite que os sentidos empíricos possam ser um aliado nas decisões de modificação de um projeto. Principalmente no que diz respeito a objetos a serem manipulados no dia a dia. Toda a interação humana com os protótipos servem de teste, mesmo que o procedimento a ser executado não seja necessariamente uma avaliação anatômica (Elverum *et al.*, 2016; Camburn *et al.*, 2017; Anderl *et al.*, 2007).

Produtos que necessitam de um *layout* gráfico para o uso e o funcionamento de máquinas e equipamentos por pessoas, precisam de um bom planejamento. Isso é fundamental quando a manipulação real homem-máquina é essencial. Em estágios iniciais de desenvolvimento, como por exemplo projetos de painéis de equipamentos, as simulações computacionais via realidade virtual podem ajudar, principalmente na definição das posições de botões, chaves e do próprio painel de comunicação via um *display*. Nos estágios intermediários de desenvolvimento de projetos passa a ser necessário a realização de testes reais (Loch *et al.*, 2001; Pineda e Kilicay-Ergin, 2010; Jones, 2007).

A anatomia humana varia muito quanto a idade, e isso define as dimensões típicas de objetos projetados para cada tipo de faixa etária. A importância de seguir procedimentos de testes em protótipos permitem a manipulação real da interação homem-máquina e define as principais modificações no projeto e desenhos técnicos utilizados para a manufatura (Drezner, 1992; Borowski, 2012; Wiltgen, 2019; Wiltgen, 2020B).

Sabe-se que nem todos os objetos e peças novas são necessariamente manipuladas fisicamente por humanos. Porém análises dimensionais com muita precisão e com limites estreitos de tolerância, quase sempre são aprovados em testes virtuais, assim como em simulações de interferência computacionais em programas de CAD. Entretanto, quando manufaturadas essas mesmas peças podem simplesmente não serem aprovadas nos testes devido as imperfeições inerentes das técnicas de manufatura, condições ambientais ou mesmo características da matéria-prima.

Um planejamento de projeto bem executado, quase sempre, define e limita as etapas no qual são absolutamente imprescindíveis as realizações de testes virtuais e reais (Pineda e Kilicay-Ergin, 2010). Dessa forma, é inserido no investimento de um novo produto os custos relativos a produção de protótipos, realização dos testes e a análise dos resultados. Conforme a experiência da equipe de engenharia, a avaliação prévia do investimento necessário na execução de testes com protótipos pode ser definida com relativa precisão. Relativa porque é possível estimar as interações necessárias em cada etapa de desenvolvimento do novo produto, mas dado a natureza incerta de um produto novo, e muitas vezes inovador, podem ser necessários outros testes não contabilizados no investimento inicial.

Para isso é importante reservar parte do investimento “flutuante” do desenvolvimento de produtos novos como uma opção caso venham a ser necessários novos testes no projeto (Smith *et al.*, 1981; Ulrich e Eppinger, 2000). A razão pela qual gerentes de projetos fazem uso de ensaios e testes com protótipos de desenvolvimento é que isso quase sempre se traduz em retorno financeiro para a empresa no lançamento antecipado de novos produtos (Otto e Wood, 1998; Blanchard e Fabrycky, 2011; Smith e Reinertsen, 1997; Ulrich e Eppinger, 2000; Ullman, 2002).

É fato que a não utilização de protótipos em desenvolvimento pode elevar significadamente os riscos, e assim, o custo total de desenvolvimento, além do prazo de finalização de um projeto (Smith *et al.*, 1981; Drezner, 1992).

6. Discussão e Conclusão

Os protótipos físicos reais podem reduzir os riscos de um projeto, mas nunca é possível eliminar totalmente os riscos inerentes as novas e inovadoras ideias, faz parte de sua natureza.

Dessa forma, fica expresso que o objetivo de um protótipo é ajudar na aprendizagem e identificação de incógnitas durante o desenvolvimento de um novo produto. No qual as incógnitas a serem solucionadas envolvem desde problemas de engenharia a satisfação dos clientes. Os testes realizados com os protótipos transmitem as equipes de engenharia e gerência (*stakeholders*) a intenção do projeto, mostrando e mantendo o controle do desenvolvimento do produto, sempre atento às metas e resultados almejados.

Existem diferentes opções de testes e de fabricação de protótipos conforme cada projeto em desenvolvimento, cabendo a equipe de engenharia lastrear a melhor forma de realizar os testes e as análises dos protótipos. Os custos podem ser reduzidos com a escalabilidade dos protótipos e dos testes a serem realizados, principalmente com a utilização da manufatura aditiva como instrumento de prototipagem para testes.

No futuro em plantas da nova revolução industrial na manufatura avançada, essas etapas de testes com protótipos (físicos ou analíticos) fará parte do processo de desenvolvimento de produtos, e devem compor células de fabricação especialmente projetadas para isso dentro da cadeia de produção.

O desenvolvimento com testes em protótipos físicos reais atualmente é uma realidade técnica factível e economicamente viável, e permite que a indústria e a academia possam desfrutar de seus benefícios em novos produtos e novas ideias a serem implementadas de forma mais rápida e eficaz.

Referências

ABERNATHY, W.; ROSENBLOOM, R. *Parallel and Sequential R&D Strategies: Application of a Simple Model.* IEEE Transactions on Engineering Management, v.15(01), pp.2-10, 1968.

ALCALDE, E.; WILTGEN, F. *Estudo das Tecnologias em Prototipagem Rápida: Passado, Presente e Futuro.* Revista de Ciências Exatas da Universidade de Taubaté, Taubaté, v.24(02), pp.1-9, 2018.

ANDERL, R.; MECKE, K.; KLUG, L. *Advanced Prototype with Parametric Prototypes.* Digital Enterprise Technology Springer, pp.503-510, 2007.

BLANCHARD, B. S.; FABRYCKY, W. J. *Systems Engineering and Analysis.* Pearson Education - Prentice Hall, 2011. 800p.

BOROWSKI, S. M. *Competitive Prototyping in the Department of Defense: Suggestions for a Better Approach.* The Defense Acquisition University Research Symposium, Fort Belvoir, VA., 2012.

BUCHENAU, M.; SURJ, J. F. *Experience Prototyping.* Proceedings of the 3rd Conference on Designing Interactive Systems: Processes, Practices, Methods, and Techniques, pp.424-433, 2000.

BUDDE, R.; KAUTZ, K.; KUHLENKAMP, K.; ZÜLLIGHOVEN, H. *Prototyping: An Approach to Evolutionary System Development.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1992. 205p.

CANCIGLIERI, O. J.; JÚNIOR, A. S.; SANT'ANNA, A. O. *Método de Decisão dos Processos de Prototipagem Rápida na Concepção de Novos Produtos*. Gestão de Produção, v.22(02), pp.345-355, 2015.

CAMBURN, B.; VISWANATHAN, V.; LINSEY, J.; ANDERSON, D.; JENSEN, D.; CRAWFORD, R.; OTTO, K.; WOOD, K. *Design Prototyping Methods: State of the Art in Strategies, Techniques, and Guidelines*. Cambridge University Press, Design Science, v.3(03), pp.1-33, 2017.

COMENALE, W., WILTGEN, F. *Automação Industrial para a Manufatura Avançada com Apoio da Engenharia de Sistemas & Requisitos*. 11° COBEF 2021 - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Curitiba, 24-26 de maio, p.1-8, 2021.

CRUMP, S. S. *Rapid Prototyping Using FDM*. Modern Casting, pp.36-38, 1992.

DAHAN, E.; MENDELSON, H. *An Extreme Value Model of Concept Testing*. Management Science, pp.102-116, 2001.

DREZNER, J. A. *The Nature and Role of Prototyping in Weapon System Development (R-4161-ACQ)*. RAND Corporation, National Defense Research Institute, 1992. 152p.

ELVERUM, C. W.; WELO, T.; TRONVOLL, S. *Prototyping in New Product Development: Strategy Considerations*. 26th CIRP Design Conference, Elsevier, pp.1-6, 2016.

FABRYCKY, W. J. *Systems Engineering: Its Emerging Academic and Professional Attributes*. Proceedings ASEE Annual Conference and Exposition, Louisville, KY, June 21-23, pp.15.1162.1-15.1162.17, 2010.

GOMES, J.; WILTGEN, F. *Avanços na Manufatura Aditiva em Metais: Técnicas, Materiais E Máquinas*. Revista Tecnologia, v.41(01), pp.1-16, 2020.

GUO, N.; MING C.; LEU, M. C. *Additive Manufacturing: Technology, Applications and Research Needs*. Front. Mech. Eng., pp.1-30, 2013.

HALL, R. R. *Prototyping for Usability of New Technology*. International Journal of Human Computer Studies, v.55(04), pp.485-501, 2001.

HOSS, M. J. *Prototipagem de Serviços: Um Estudo Exploratório com Foco na Iluminação de Habitações de Interesse Social*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2014. 182p.

HOUDE, S.; HILL, C. *What do Prototypes Prototype?*. Handbook of Human-Computer Interaction Elsevier Science, pp.367-381, 1997.

HWANG, D.; LAUFF, C.; PEREZ, K. B.; CAMBURN, B. A.; WOOD, K. L. *Comparing the Impacts of Design Principles for Additive Manufacturing on Student and Experienced Designers*. International Journal of Engineering Education v.36(06), pp.1862-1876, 2020.

JANG, J.; SCHUNN, C. D. *Physical Design Tools Support and Hinder Innovative Engineering Design*. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, v.134, pp.1-9, 2012.

JEFFREY, C. *An Introduction to Plant Taxonomy*. Cambridge University Press, New York, USA, 1982. 154p.

JENSEN, L. S.; NISSEN, L.; BILDE, N.; ÖZKIL, A. G. *Prototyping in Mechatronic Product Development: How Prototype Fidelity Levels Affect User Design Input*. International Design Conference Design Methods, pp.1173-1184, 2018.

JIMÉNEZ, M.; ROMERO, L.; DOMÍNGUEZ, I. A.; DEL MAR ESPINOSA, M.; DOMÍNGUEZ, M. *Additive Manufacturing Technologies: An Overview About 3D Printing Methods and Future Prospects*. Hindawi Complexity, pp.1-30, 2019.

JONES, H. W. *Integrated Systems Testing of Spacecraft*. International Conference on Environmental Systems SAE, Transactions Journal of Aerospace, pp.1-11. 2007.

KRUTH, J. P. *Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques*. Proceedings of the 41th CIRP General Assembly, v.40, pp.603 - 614, 1991.

LIM, Y. K.; STOLTERMAN, E.; TENENBERG, J. *The Anatomy of Prototypes: Prototypes as Filters, Prototypes as Manifestations of Design Ideas*. ACM Transactions on Computer-Human Interaction, v.15(07), pp.1-27, 2008.

LINO, F. J.; NETO, R. J. *Diluição de Fronteiras Entre o Design e a Indústria Através da Prototipagem Rápida – Um Caso de Estudo.* Cadernos Empresariais, v.2(07), pp.58-63, 2000.

LOCH, C. H.; TERWIESCH, C.; THOMKE, S. *Parallel and Sequential Testing of Design Alternatives.* Management Science, pp.663-678, 2001.

Michaelraj, A. Taxonomy of physical prototypes: structure and validation, Master of Science, Mechanical Engineering, Clemson University, 2009. 83p.

MYERS, Y.; NORTON, J., *Rapid Manufacturing with Rapid Tooling.* Prototyping Technology International, pp. 30-34, 1998.

NEVINS, J. L.; WHITNEY, D.E. *Concurrent Design of Products and Processes.* McGrawHill, 1989. 583p.

NISHIMURA, P. G.; RODRIGUES, O. V.; JÚNIOR, G. B.; DA SILVA, L. A. *Prototipagem Rápida: um Comparativo entre uma Tecnologia Aditiva e uma Subtrativa.* Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, Belo Horizonte-BH, 4 a 7 de outubro, 2016.

OTTO, K. N.; WOOD, K. L. *Product Design: Techniques In Reverse Engineering and New Product Development.* Research in Engineering Design, v.10, pp.226-243, 1998.

PETRAKIS, K.; WODEHOUSE, A.; HIRD, A. *The Concept of Purposeful Prototyping: Towards a New Kind of Taxonomic Classification.* 22nd International Conference on Engineering Design, pp.1-9, 2019.

PINEDA, R.L.; KILICAY-ERGIN, N. *System Verification, Validation, and Testing. Systems Engineering Tools and Methods.* CRC Press, pp.81-109, 2010.

RAO, P. N.; LERNER, Y.; KOUZNETSOV, V. *Rapid Prototyping Applications in Metal Casting.* Journal Intitution of Eneigneers, v.64(03), pp.1-7, 2003.

RIBEIRO, R., WILTGEN, F. *Desenvolvimento de Colete com Sensores Embarcados para Aplicação Civil e Militar.* XXIII - SIGe 2021 - Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa, São José dos Campos, 28-29 de setembro, p.1-5, 2021.

RODRIGUES, O. V.; ALENCAR, F.; BARATA T. Q. *Combining Rapid Prototyping with More Conventional Production Processes.* Proceedings of the 5th International PMI Conference Proceedings. University College Ghent, v.1, pp.147-150, 2012.

ROSOCHOWSKI, A.; MATUSZAK, A. *Rapid Tooling: The State of the Art.* Journal of Materials Processing Technology, v.106, pp.191-198, 2000.

SMITH, G. K.; BARBOUR, A. A.; MCNAUGHER, T. L.; RICH, M. D.; STANLEY, W. *The Use of Prototypes in Weapon System Development (R-2345-AF).* RAND Corporation, National Defense Research Institute, 1981. 201p.

SMITH, P. G.; REINERTSEN, D. G. *Desenvolvendo Produtos na Metade do Tempo.* Ed. Futura, 1997. 358p.

TAHERA, K.; EARL, C.; ECKERT, C. *A Method for Improving Overlapping of Testing and Design.* IEEE Transactions on Engineering Management, v.64(02), pp.179-192, 2017.

ULLMAN, D. G. *The Mechanical Design Process.* McGraw-Hill Professional, 2002. 448p.

ULRICH, K. T.; EPPINGER, S. D. *Product Design and Development.* McGraw-Hill, 2000. 433p.

VASCONCELOS, P.; LINO, F. J.; NETO, R. J. *O Fabrico Rápido de Ferramentas ao Serviço da Engenharia Concorrente.* Tecnometal, Portugal, pp.1-13, 2001.

WALL, M. B.; ULRICH, K. T.; FLOWERS, W. C. *Evaluating Prototyping Technologies for Product Design.* Journal of Research in Engineering Design, v.3(03), pp.163-177, 1992.

WOHLERS, T. T., *Rapid Prototyping & Tooling – State of the Industry.* Worldwide Progress Report, pp.1-12, 2001.

WILTGEN, F. *Protótipos e Prototipagem Rápida Aditiva sua Importância no Auxílio do Desenvolvimento Científico e Tecnológico.* 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, São Carlos-SP, 5 a 7 agosto, 2019.

WILTGEN, F. *Técnica de Ensaios de Sistemas Complexos com Metodologia de Engenharia de Sistemas & Requisitos.* Revista Interfaces Científicas, v.4 (01), p.51-60, 2020A.

WILTGEN, F. *A Manufatura Avançada Precisa de uma Engenharia Avançada.* Revista Tecnologia, v.41(02), pp.1-11, 2020B.

WILTGEN, F. *Testing Plan in Systems & Requirements Engineering for Strategic Engineering Areas.* COBEM 2021 - 26th International Congress of Mechanical Engineering, Florianópolis, 22-26 de novembro, p.1-10, 2021.

WILTGEN, F. *Análise no Domínio do Problema com Técnicas de Engenharia de Sistemas & Requisitos.* Revista Tecnologia, p.1–20, 2022, aguardando publicação.