

GESTÃO NO CICLO DE VIDA DO PROJETO: EXPERIMENTO PARA REDUÇÃO DE MASSA NO AEROFÓLIO

PROJECT LIFECICLE MANANGEMET: EXPERIMENT FOR MASS REDUCTION ON AIRFOIL

LUCIANO SOUZA LAURINDO

PECEGE - PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM ECONOMIA E GESTÃO DE EMPRESAS (ESALQ/USP)

FABRICIO MARTINS LACERDA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO PARANÁ - UNESPAR - CAMPUS APUCARANA

Agradecimento à órgão de fomento:

IFI - Instituto de Fomento e Coordenação Industrial

GESTÃO NO CICLO DE VIDA DO PROJETO: EXPERIMENTO PARA REDUÇÃO DE MASSA NO AEROFÓLIO

Objetivo do estudo

Apresentar a gestão do ciclo de vida do projeto na produção de um aerofólio.

Relevância/originalidade

A ideia surgiu da intenção de integrar o conceito de aeronaves mais leves que o ar, como balões e dirigíveis, classificadas como aeróstatos, ao conceito de aeronaves mais pesadas que o ar, como aviões, classificadas como aeródinos.

Metodologia/abordagem

O desenvolvimento do projeto teve seu delineamento classificado como explicativo e experimental. A parte experimental foi conduzida para gerar dados, e parte explicativa demonstrou o quanto foi significativa a redução de massa no aerofólio através de tabelas e da equação de sustentação.

Principais resultados

No processo de impressão em ambiente de gás hélio, foi possível obter um resultado positivo, que validou o processo sequencial criado. Na correlação entre a massa e a sustentação aerodinâmica ressalta a importância da redução de massa.

Contribuições teóricas/metodológicas

O experimento contribui com teoria ao adotar a teoria de gestão de projetos, a primeira fase do ciclo de vida do produto, a redução das falhas na curva da banheira onde foi utilizado o PDCA, na produção dos aerofólios.

Contribuições sociais/para a gestão

A redução de massa proposta neste estudo, tem como hipótese, se implementada em algumas partes da aeronave, proporcionar redução de gasto de combustível, que pode ser repassado para os usuários do transporte aéreo, tornando mais barato o transporte de pessoas ou de

Palavras-chave: Impressora 3D, Experimento, Gás hélio, Poli ácido, Curva da banheira

PROJECT LIFECICLE MANANGEMET: EXPERIMENT FOR MASS REDUCTION ON AIRFOIL

Study purpose

To demonstrate project lifecycle management in the production of an airfoil.

Relevance / originality

The idea arose from the intention to integrate the concept of lighter-than-air aircraft, such as balloons and airships, classified as aerostat, to the concept of heavier-than-air aircraft, such as planes, classified as aerodynes.

Methodology / approach

The development of the project was classified as explanatory and experimental. The experimental part was conducted to generate data, and the explanatory part demonstrated how significant the reduction of mass in the airfoil was through tables and the lift equation.

Main results

With the process of printing in a helium gas environment, it was possible to obtain a positive result, which validated the sequential process created. In the correlation between mass and aerodynamic lift, the importance of mass reduction is highlighted.

Theoretical / methodological contributions

The experiment contributes with theory by adopting project management theory, the first phase of the product's life cycle, the reduction of flaws in the curve of the bathtub where PDCA was used, in the production of airfoils.

Social / management contributions

The mass reduction proposed in this study has the hypothesis, if implemented in some parts of the aircraft, would be to reduce fuel consumption, which can be passed on to air transport users, making it cheaper to transport people or cargo.

Keywords: 3D Printer, Experiment, Helium gas, Poly acid, Bathtub curve

GESTÃO NO CICLO DE VIDA DO PROJETO: EXPERIMENTO PARA REDUÇÃO DE MASSA NO AEROFÓLIO

1 Introdução

A redução de peso nas aeronaves tem sido uma busca incessante pelos fabricantes e operadores do setor aeronáutico, visando o aumento da autonomia de voo, com o propósito de reduzir o custo operacional, transportar mais passageiros e carga paga, entre outros diversos fatores (Lopes & Rodrigues Filho, 2021).

A palavra projeto, segundo o dicionário (Dicio, 2023), tem como significado o planejamento que se faz com a intenção de realizar ou desenvolver alguma coisa. Neste estudo foi demonstrado o ciclo de vida do projeto, como foi feita sua gestão e onde ele se encontra dentro do ciclo de vida do produto (Lawley & Pamela, 2019). Já a palavra massa, segundo Homa (2009), é a quantidade de matéria contida no corpo, enquanto o conceito da densidade é a massa por unidade de volume.

Foram integrados os conceitos de ciclo de vida do projeto (PMI, 2017), ciclo de vida do produto, (Lawley & Pamela, 2019) e curva da banheira (Sellitto, 2005). Seguindo estas integrações, foi demonstrado o desenvolvimento através de experimentação (Prodanov, 2013), e a redução da taxa de falha (Sellitto, 2005).

O ciclo de vida do projeto é composto pelas fases de início do projeto, organização/preparação e término do projeto. Os seus processos são divididos em grupos como iniciação, planejamento, execução, monitoramento/control e encerramento, onde estes tópicos deram base para o gerenciamento do início ao fim do projeto (PMI, 2017). No entanto, não há consenso na literatura sobre as fases do ciclo de vida de um projeto, devido à complexidade e à diversidade dos projetos (Kerzner 2011). A metodologia utilizada no projeto foi preditiva com etapas incrementais para a execução (Prodanov, 2013).

Parte do desenvolvimento tratou da fabricação de protótipos de forma experimental, utilizando o processo PDCA - PLAN-DO-CHECK-ACT - (Campos, 1994) para redução da taxa de falhas e melhoria contínua durante a elaboração do desenho ou execução do processo produtivo da amostra. O projeto foi dividido em fases, definidas por duração, requisitos entregáveis, de forma ordenada e sequencial, corroborando para a conclusão do projeto, além dos subcomponentes como a junção de conceitos. Entre as fases do projeto foram adotados pontos de decisão, onde criou-se pontos possíveis de avançar, recuar ou parar o projeto ou a fase (PMI, 2017).

Todo o ciclo de vida do projeto é apenas a primeira fase do ciclo de vida do produto, chamado de desenvolvimento. As outras fases do ciclo de vida do produto são a introdução do produto no mercado, crescimento, maturidade e declínio (Lawley & Pamela, 2019).

A curva da banheira é dividida em mortalidade infantil, vida útil e descarte. A mortalidade infantil foi o nome dado às falhas, devido às deficiências iniciais do projeto, que tendem a diminuir à medida em que os problemas são identificados e resolvidos, durante a execução do projeto, desde a elaboração do desenho, até a fabricação das amostras, os problemas foram identificados e resolvidos através do PDCA e medidos através da curva da banheira, sendo que, para executar a fase seguinte, a fase anterior deveria estar em um nível aceitável. A vida útil ou maturidade é referente a utilização do produto, já lançado no mercado. Neste período a taxa de falha tende a ser baixa e as falhas imprevisíveis. Na fase de descarte, a taxa de falha tende a aumentar, caracterizando desgaste, obsolescência, fadiga ou baixa resistência do material, onde o produto deixa de ser utilizado por apresentar problemas (Sellitto, 2005).

Neste trabalho foi abordada apenas a redução da taxa de falha através do processo criado no diagrama de precedência, onde as falhas precisam ser sanadas para avançar a fase seguinte. O projeto desenvolvido visou a produção do aerofólio a ser modelado do tipo AH-160. O experimento foi feito em escala reduzida, sendo fabricado em uma impressora 3D, com a intenção de reduzir a massa através do processo criado. A impressão 3D foi executada em local, no qual o ar ambiente foi removido e inserido gás hélio, análogo ao processo de soldagem com uso de gás (Marques et al., 2009), o qual purga o ar ambiente. A ideia surgiu da intenção de integrar o conceito de aeronaves mais leves que o ar, como balões e dirigíveis, classificadas como aerostatos, ao conceito de aeronaves mais pesadas que o ar, como aviões, classificadas como aeródinos (Homa, 2009).

Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi apresentar a gestão do ciclo de vida do projeto na produção de um aerofólio. Para tanto, abordou-se a integração de conceitos e processos, criando um produto mais leve, para uso no setor aeronáutico, a partir da realização de um experimento.

Este estudo está estruturado da seguinte forma, além desta introdução, que faz uma breve abordagem conceitual, assim como o referencial teórico, a metodologia de pesquisa é apresentada na seção 3; na seção 4, estão as análises e discussão dos resultados, e; por fim, as conclusões estão na seção 5.

2 Referencial Teórico

No desenvolvimento deste estudo, no constructo da Gestão do Projetos e Desenvolvimento, foram utilizadas as referências de (Campos, 1994) para a abordagem de PDCA visando o aperfeiçoamento do processo até o ponto aceitável para a próxima fase. As falhas acumuladas durante o desenvolvimento, proveram dados para a curva da banheira, sendo o ponto inferior da curva, o marco de conclusão da fase (Sellitto, 2005).

Para o Ciclo de Vida do Produto, foram utilizados os referências teóricos de (Lawley & Pamela, 2019) e (Prodanov, 2013), para arquitetar e estruturar o projeto e seu desenvolvimento. Ainda neste contexto, foram utilizadas as referências de (Dicio, 2023), (Keeling, 2019), (Kerzner, 2011) e (PMI, 2017) para o Ciclo de vida do Projeto, o qual deu base a elaboração do projeto, integração de conceitos e processos e meios para sequenciar a execução.

Já na construção teórica da análise de resultados, as referências teóricas de (Homa, 2009), foram utilizadas para prover as equações, assim como os fundamentos das aeronaves aerostáticas e aeródinos, equações bases utilizadas e a noção do equilíbrio das forças durante um voo reto e nivelado. A partir destes princípios foi possível desenvolver o raciocínio que permitiu associar a massa, a velocidade de sustentação da aeronave.

Para a execução do projeto, as referências utilizadas na área de conhecimento de impressão 3D foram (Cunico, 2015) e (Lira, 2012), que possibilitaram o conhecimento para operar este universo de possibilidades, que torna a materialização dos desenhos elaborados em produtos, que neste caso foi o aerofólio.

Já para a construção da câmara, que possibilitou a remoção do ar e impressão 3D em meio ao gás hélio, fez-se uso da literatura de (Marcellini, 1999), o qual permitiu a fundamentação e noções de marcenaria. Ainda na execução do projeto, para a construção do aerofólio, foram utilizadas as informações de (Bigfoil.com, 2021).

Sendo a redução de peso um enorme motivador no setor aeronáutico e que inspirou o propósito deste projeto, que foi focado na redução de massa, teve-se como referência a literatura de (Lopes, 2021).

3 Metodologia

O desenvolvimento do projeto teve seu delineamento classificado como explicativo e experimental (Prodanov & Freitas, 2013). O projeto foi desenvolvido com base nas hipóteses de reduzir a massa através de aperfeiçoamento do desenho, utilização de materiais mais leves e de introduzir gás no meio do produto. A variável focal neste projeto foi a massa e para permitir o teste destas hipóteses foi escolhido para o plano experimental a utilização de impressora 3D, câmara que permitisse remover o ar ambiente e inserir outro gás, que neste caso foi escolhido o hélio, bomba de vácuo para remover o ar ambiente de dentro da câmara, manômetros e válvulas para controlar a baixa pressão e inserir gás hélio durante a impressão 3D.

Ainda seguindo este delineamento, o experimento foi conduzido em laboratório particular. A parte experimental tratou de conduzir o experimento para gerar dados, enquanto a parte explicativa tratou de demonstrar o quanto foi significativa a redução de massa no aerofólio através de tabelas e da equação de sustentação.

O trabalho foi realizado utilizando o ciclo de vida do projeto, conforme Figura 1 (PMI, 2017), com a finalidade de fabricar protótipos, prover dados quantitativos para a análise, material para observação e materialização da integração de conceitos e do processo proposto.

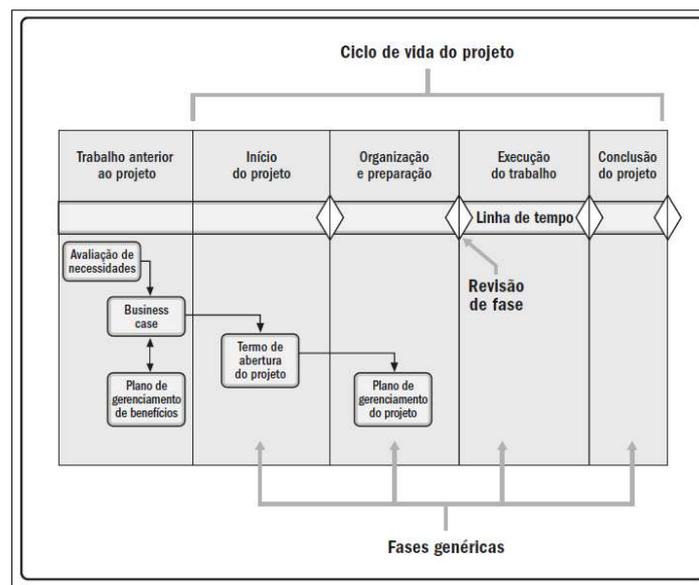


Figura 1 – Fases do ciclo de vida do projeto
Fonte: PMI (2017)

Para abertura do projeto, visando a redução de massa, foi escolhida a fabricação de protótipos, conforme descrito no PMI (2017), em escala reduzida para estudo, de forma a permitir a análise da massa dos protótipos, com dados sólidos provenientes de um processo experimental.

Os custos e aquisições foram gerenciados, de modo a estabelecer um teto de gasto, com foco em permitir a execução sem comprometer o orçamento, balancear a qualidade com o custo, cumprir o propósito do experimento e reduzir o risco.

Sendo identificadas as partes interessadas no tópico redução de massa para aeronaves, de forma qualitativa e não oficial, foi comentado com dez colaboradores da engenharia da empresa fabricante de aeronave Embraer e dez colaboradores do órgão certificador militar do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), integrantes do grupo de engenharia do Instituto de Fomento Industrial (IFI), quanto ao desenvolvimento deste

experimento e todos dissertaram ser de grande contribuição para o setor aeronáutico este assunto.

Os dados resultantes do experimento forneceram informações quantitativas, para apresentar a redução da taxa de falha, conforme curva da banheira e redução de massa que comprovaram as hipóteses. O instrumento de coleta de dados utilizado após o experimento foi uma balança com a precisão de 0,1 gramas. Cada protótipo foi pesado após a fabricação e observadas as características do material e a interação do gás com material. De forma analítica, os dados foram suportados por gráficos, tabelas e equações.

Alguns pontos deficientes foram as limitações de operação da impressora 3D, limitações de resistência estrutural da câmara de pressão fabricada, alto custo do gás, que limitou a quantidade de protótipos fabricados.

A bibliografia foi utilizada para a estruturação do experimento, na Figura 2, foi destacado em vermelho a fase de desenvolvimento abordada.

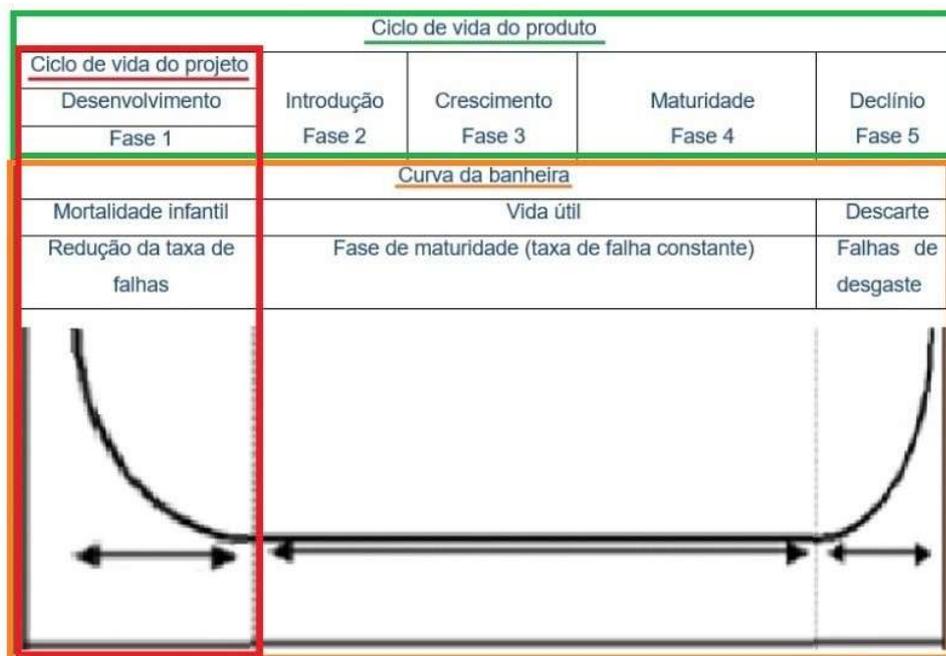


Figura 2. Ciclo de vida do projeto, ciclo de vida do produto e curva da banheira
 Fonte: Lawley e Pamela (2019); PMI (2017); Sellitto (2005)

O planejamento foi preparado para contemplar a elaboração do desenho do aerofólio, a fabricação dos protótipos e da câmara de pressão. Ainda no planejamento foram dispostas planilhas de materiais, custos, as sequências entre as fases do projeto, diagramas de precedência e análises. Foram divididas em 6 fases, sendo cada fase um ponto entregável, demonstradas no diagrama de precedência.

Foi definido que o protótipo seria fabricado em uma impressora 3D Prusa I3, os materiais de fusão poli ácido láctico [PLA], poli ácido láctico de baixa densidade [PLA-LW] e gás hélio no processo. Com a especificação aerodinâmica AH95-160, (Bigfoil.com, 2021).

4 Análise e discussão dos resultados

O experimento foi conduzido em laboratório particular na cidade de São José dos Campos, São Paulo, de forma preditiva, onde foram utilizados recursos como uma câmara de pressão, impressora 3D, conforme Figura 3, (Cunico, 2015).

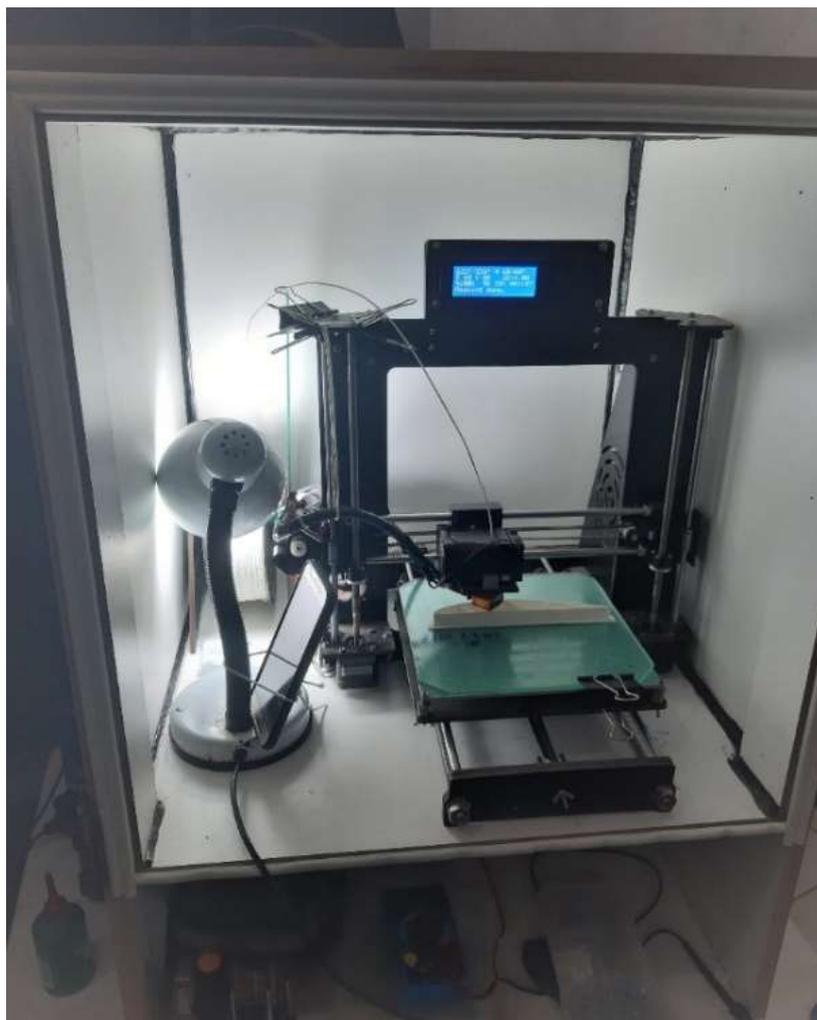


Figura 3. Impressora 3D
Fonte: Resultados originais da pesquisa

Elaborada planilha com materiais, custos e prazos, foram feitas as aquisições necessárias, montagem da câmara de pressão e desenvolvimento do desenho do aerofólio, onde foram utilizados os pontos disponíveis no site Bigfoil.com (2021), ficou representativo ao modelo real construído para aeronaves. O critério de escolha do aerofólio foi obter um formato com maior volume interno e sustentação em baixas velocidades para estudos futuros, sendo assim o perfil aerodinâmico escolhido foi o AH95-160, onde o AH significa Althaus, o 95 significa noventa e cinco por cento da curvatura máxima da corda e o 160 significa dezesseis por cento da máxima espessura da corda.

O experimento foi composto de 6 fases, sendo quatro sequenciais, uma fase em paralelo e uma fase de análise. Cada fase foi um ponto de verificação entregável (PMI, 2017), o ciclo de vida deste projeto, teve seu início, organização, preparação, execução, resultados, análises, conclusões e foi encerrado, fechando assim o ciclo.

Na etapa de planejamento foram levantados custos, realizadas as aquisições de materiais, elaborado as sequências entre as fases do projeto, execução, monitoramento e análises.

Os custos e aquisições foram listados na Tabela 1, não excedendo o teto de R\$ 1.600,00. Os dois primeiros ativos da Tabela 1 já estavam disponíveis, portanto, não foi necessário alocar recursos. A energia elétrica foi calculada com base na potência da impressora, da bomba de vácuo, o tempo de operação, multiplicado pelo valor do kilowatt hora.

Tabela 1. Lista de materiais e custos

Material	Quantidade	Custo (R\$)	Total (R\$)
Impressora 3D	0	1370,00	0
Bomba de vácuo	0	478,00	0
Válvula de corte	1	176,00	176,00
Selante PU40	2	31,90	63,80
Cola madeira	1	22,95	22,95
Prego 13x15	1	18,90	18,90
Tranca	4	20,00	80,00
Filamento PLA comum	1	130,00	130,00
Filamento PLA-LW	1	296,18	296,18
Gás hélio aluguel	1	550,00	550,00
Chapa de MDF 15mm	1	231,00	231,00
Energia elétrica	8	16,25	130,00
Total			1568,83

Fonte: Resultados originais da pesquisa

As sequências entre as fases do projeto dispuseram do critério o prazo deste trabalho, conforme Figura 4, com seis fases entregáveis, sendo quatro sequenciais, uma fase em paralelo e uma fase de análise.

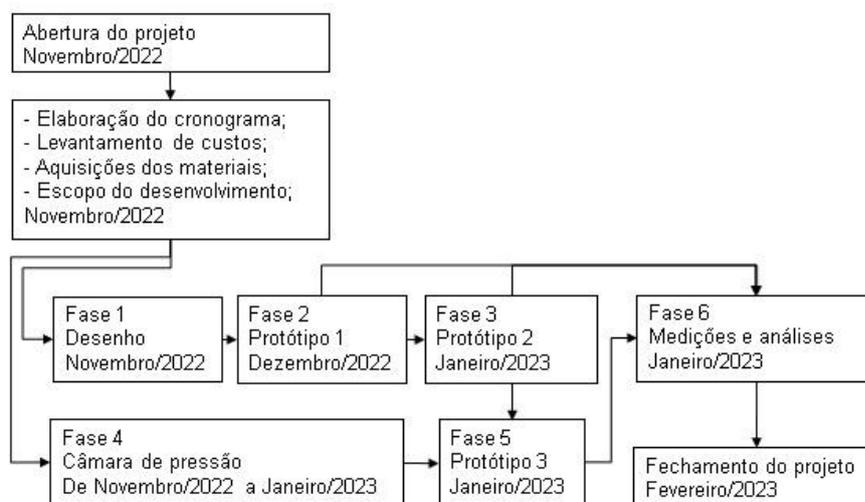


Figura 4. Sequências entre as fases do projeto

Fonte: Resultados originais da pesquisa

Foi elaborado o diagrama de precedência (Keeling, 2019) e utilizado o PDCA como meio de atingir o resultado esperado (Campos, 1994), com o escopo do desenvolvimento conforme PMI (2017), de forma ordenada e sequencial, onde as fases seguintes dependem da conclusão da fase anterior, até a obtenção de um resultado aceitável para a próxima fase.

Ainda seguindo o conceito de PDCA, foi elaborado diagrama de precedência do desenho, da fabricação dos protótipos, da fabricação da câmara de pressão. Foi feito o planejamento “Plan”, Execução “Do”, verificados os defeitos “Check” e efetuados os ajustes “Action”, conforme Figura 5, para as fases de um a cinco deste experimento, enquanto a fase seis foi planejada para a análise.

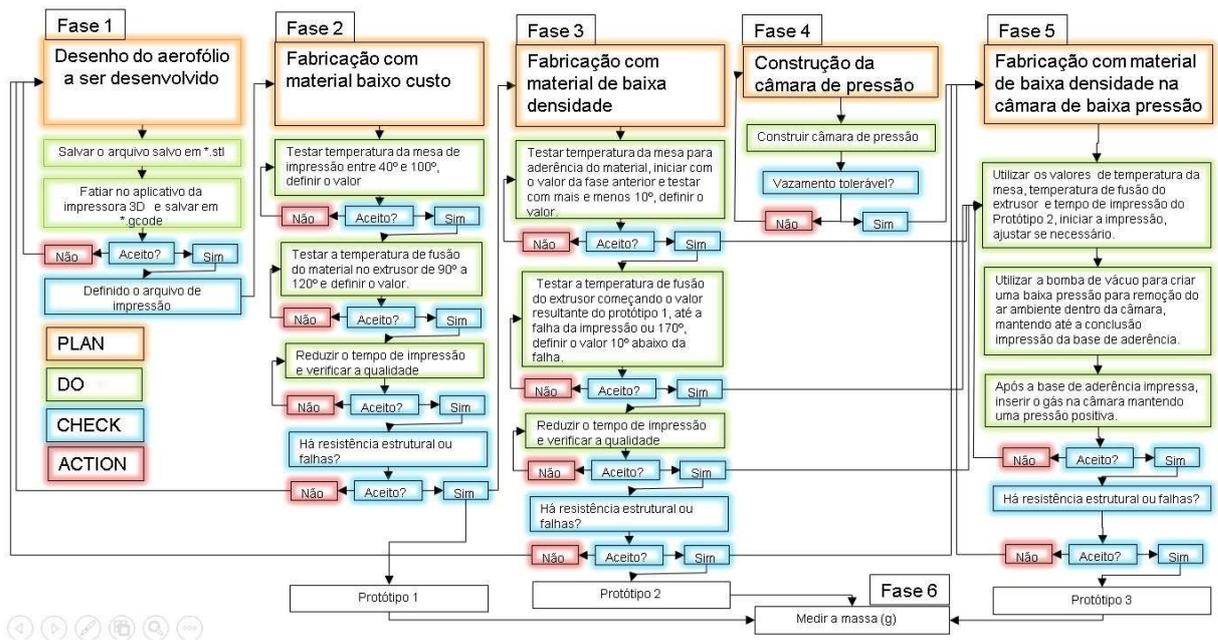


Figura 5. Diagrama de precedência
 Fonte: Resultados originais da pesquisa

Para a execução do experimento, o desenho foi feito conforme Figura 6, sendo um aerofólio tipo AH 95-160, em escala de 180x100mm, compreendido pela fase 1.

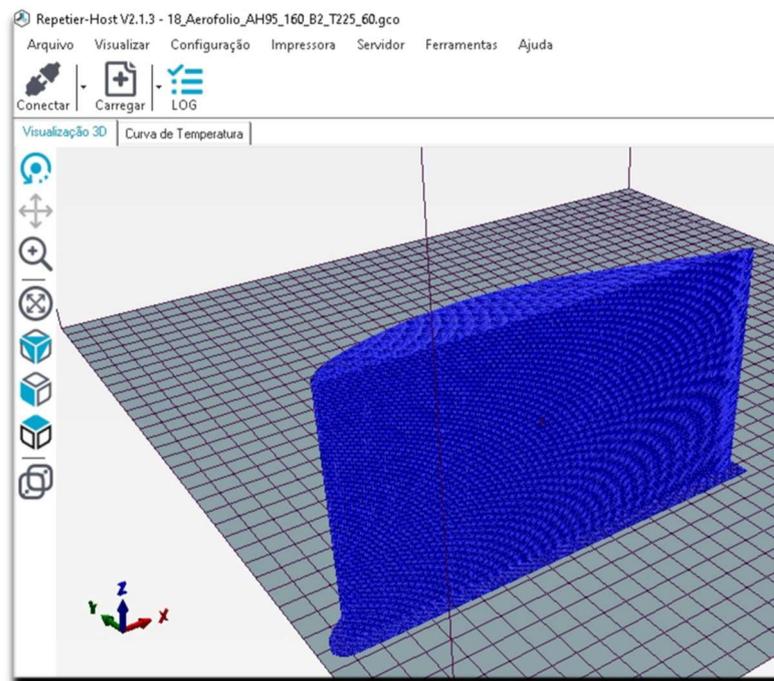


Figura 6. Fase 1, elaboração do desenho
 Fonte: Resultados originais da pesquisa

Ainda na fase 1, o desenho necessitou de 19 modificações. Foram reduzidas as falhas gradativamente, conforme Figura 7, sendo contabilizadas as falhas estruturais, falhas de fixação na mesa e impressões de baixa qualidade, até o arquivo ter uma estrutura resistente e uma qualidade aceitável após compilação no programa de fatiamento chamado de “Repetier-host”, que gerou o arquivo para a impressão 3D, que é lido pela impressora Prusa I3. O arquivo 19 ao

ser impresso apresentou fragilidade estrutural, sendo adotado o arquivo 18 como o melhor resultado.



Figura 7. Fase 1, redução das falhas
 Fonte: Resultados originais da pesquisa

Na fase 2 do experimento, após o desenho estar definido, foram produzidas unidades com poli ácido láctico [PLA] comum, através de fusão em uma impressora 3D, Prusa-I3 (Lira, 2021). Para obter uma qualidade aceitável foram necessárias quatro unidades, na tentativa de obter a menor massa e resistência, alterando a velocidade da impressão, densidade da impressão, temperatura da mesa para fixação e temperatura do extrusor para a fusão do PLA.

Na busca de menor massa e resistência estrutural aceitável, o desenho número 18 demonstrou o melhor resultado, abaixo ilustrado no protótipo 1C, enquanto o desenho de número 19, do protótipo 1D, apresentou fragilidade estrutural, conforme Figura 8.

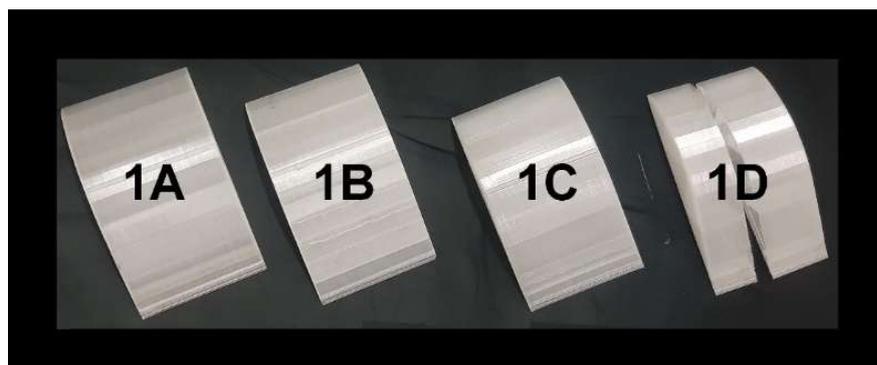


Figura 8. Fase 2, fabricação do protótipo 1
 Fonte: Resultados originais da pesquisa

Já na fase 3, foi utilizado um poli ácido láctico de baixa densidade [PLA-LW], onde sua densidade se reduz com o aumento da temperatura de fusão do extrusor, que pode variar de 190°C à 270°C. O experimento foi conduzido e o desenho número 18 foi executado, com a temperatura da mesa a 60°C, e do extrusor, sendo iniciada a 210°C, com incremento de 16°C a cada hora, que corresponde a vinte por cento do tempo total de impressão.

Após quatro horas de impressão, com a temperatura ajustada para 258°C, a impressora alcançou somente 247°C e houve a falha da impressão, conforme Figura 9, momento que o

filamento derreteu antes do extrusor. Para ajuste, foi reduzida a temperatura em 11°C, ficando então o extrusor programado em 247°C para o desenho número 18, sendo limitante esta temperatura neste modelo de impressora.

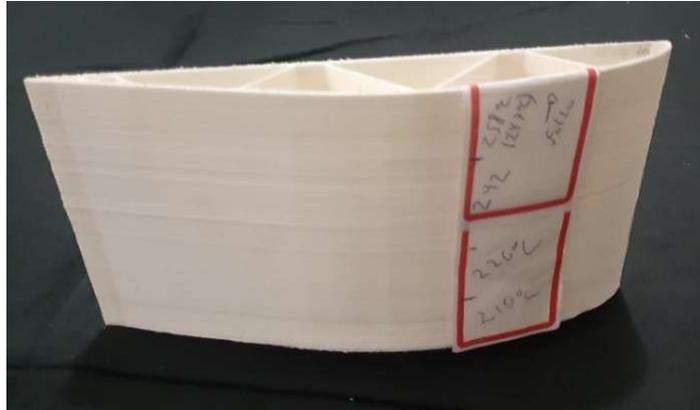


Figura 9. Fase 3, ajuste de temperatura para o filamento PLA-LW
Fonte: Resultados originais da pesquisa

Ainda na fase 3, foi impresso o desenho número 18, com a temperatura em 247°C, sendo concluído com sucesso o protótipo 2 do experimento, conforme Figura 10.



Figura 10. Fase 3, fabricação do protótipo 2 com filamento PLA-LW
Fonte: Resultados originais da pesquisa

A fase 4 do projeto, foi a elaboração, construção e teste da câmara de pressão, com o objetivo de permitir que o gás ficasse em meio a impressão 3D. Devido ao pequeno volume interno da peça, não foi esperado um resultado muito expressivo, somente um resultado positivo, mas analiticamente e matematicamente, foi possível comprovar o incremento de eficiência, proporcional ao volume aplicado.

Através dos processos convencionais de marcenaria (Marcellini, 1999), foi construída a câmara de pressão, com madeira de média densidade [MDF] de quinze milímetros, cola, pregos, parafusos, selante PU40, bomba de vácuo, manômetros, válvulas e cilindro pressurizado com gás hélio, conforme Figura 11.



Figura 11. Fase 4, construção da câmara de pressão
Fonte: Resultados originais da pesquisa

Para a fase 5, o experimento foi conduzido, sendo semelhante às fases 2 e 3, com o incremento de a impressora executar o desenho número 18 dentro de uma câmara de pressão, onde a bomba de vácuo removeu o ar do interior da câmara e o gás hélio foi inserido neste ambiente.

O processo foi iniciado ao executar o desenho número 18, onde posteriormente o gabinete foi fechado, a bomba de vácuo acionada para a remoção do ar ambiente de dentro da câmara de pressão. Após a face de fixação do aerofólio ter se completado na mesa de impressão, foi desligada a bomba de vácuo e acionado o gás hélio para completar a câmara, onde o ambiente ficou completo de gás hélio, mantendo em meio a impressão este gás.

Foram feitas duas unidades, conforme Figura 12, com a intenção de verificar a qualidade e as duas saíram semelhantes e sem falhas.

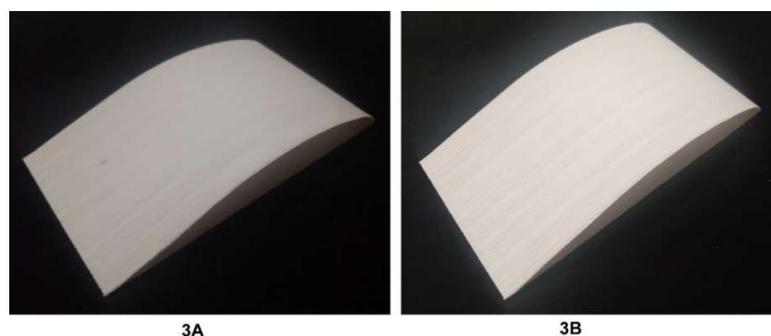


Figura 12. Fase 5, Protótipo 3 com uso da câmara de pressão e gás hélio
Fonte: Resultados originais da pesquisa

Após o desenvolvimento dos protótipos, na fase 6, foram possíveis experiências, seguindo as sequências entre as fases do projeto, Figura 3, o diagrama de precedência, Figura 5 e as medições de massa conforme Figura 13. Para a análise e eficiência dos parâmetros obtidos, foram feitas as medições de massa em uma balança, com precisão de 0,1g e verificado

que não houve residual de indicação após a medição, portanto foi confirmada a indicação de zero antes e depois da pesagem.

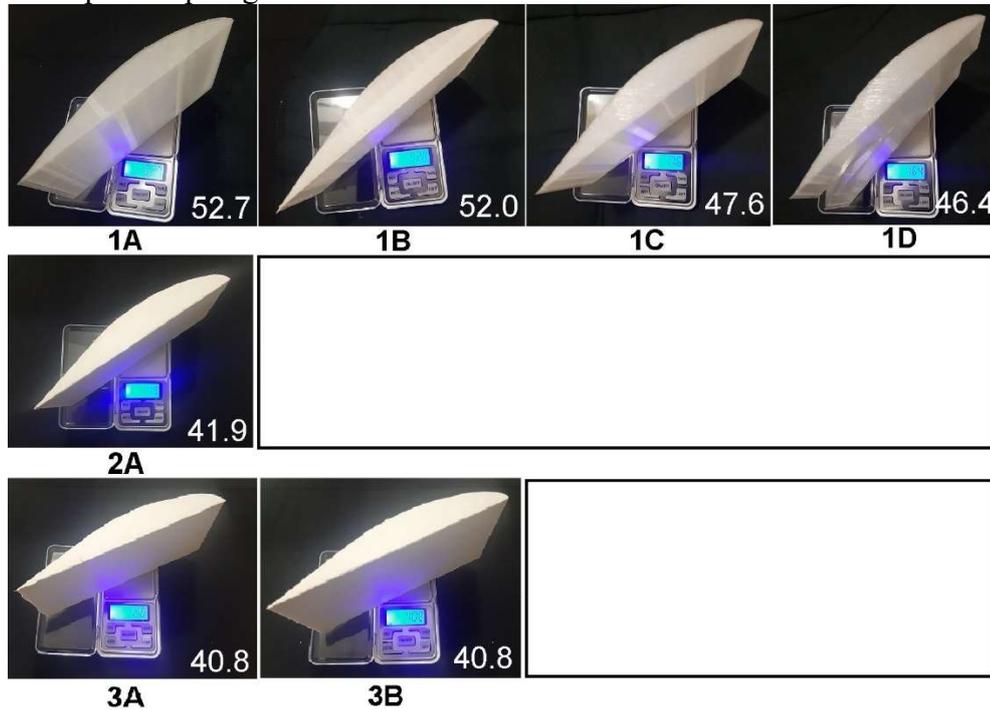


Figura 13. Fase 6, medição de massa dos protótipos
 Fonte: Resultados originais da pesquisa

Observou-se que houve uma redução de 10,8g quando comparado o protótipo 1A, fabricado com PLA, com o protótipo 3A, fabricado com PLA-LW e gás hélio. Quando comparado o protótipo 2A, feito de PLA-LW, com o protótipo 3A, feito de PLA-LW com gás hélio, houve uma redução de 1,1g, conforme Figura 14.

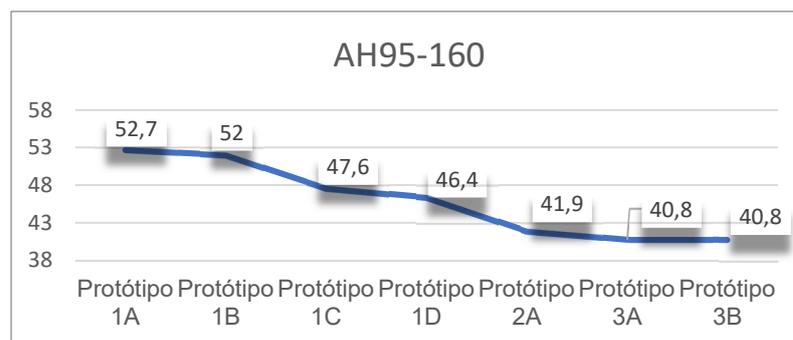


Figura 14. Fase 6, comparação dos protótipos
 Fonte: Resultados originais da pesquisa

Para comprovar o incremento de eficiência, as equações a seguir foram desenvolvidas, com o fim de demonstrar o quanto é importante a redução da massa e como está ligada a eficiência e desempenho das aeronaves (Homa, 2009).

Com os resultados obtidos no experimento, foi feito o cálculo analítico abaixo demonstrando, que em um voo reto e nivelado, o fator de carga da sustentação de uma aeronave é igual ao seu peso, ou seja, a sustentação é igual a massa vezes a aceleração da gravidade (Homa, 2009).

Seguindo a equação da sustentação, verifica-se que a redução de massa torna possível a redução de velocidade com mesmo coeficiente de sustentação em um voo reto e nivelado.

Sendo a equação de sustentação:

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L \quad (1)$$

onde, L: é “Lift”, que significa sustentação; ρ : é a densidade do ar; V^2 : velocidade do perfil aerodinâmico elevado ao quadrado; S é a área do aerofólio; e C_L : o coeficiente de sustentação.

A equação do fator de carga:

$$n = \frac{L}{W} \quad (2)$$

onde, n: fator de carga; L = sustentação; W: “weight”, que significa peso.

O equilíbrio das forças em voo reto e nivelado, a sustentação é igual ao fator de carga:

$$L = W \quad (3)$$

onde, L: sustentação; e W: peso.

A equação do Peso:

$$L = W \quad (3)$$

onde, L: sustentação; e W: peso.

A equação do Peso:

$$W = m_1 g \quad (4)$$

onde, W: peso; m_1 : massa do aerofólio; e g: gravidade.

Para o aerofólio protótipo 1A, substituindo a eq. (1) na eq. (4) temos:

$$m_1 g = \frac{1}{2} \rho V_1^2 S C_L \quad (5)$$

onde, m_1 : massa do protótipo 1; g: gravidade; ρ : densidade do ar; V_1^2 : velocidade ao quadrado do protótipo 1; S: área do aerofólio; C_L : Coeficiente de sustentação.

Para o aerofólio protótipo 3, substituindo a eq. (1) na eq. (4) temos:

$$m_2 g = \frac{1}{2} \rho V_2^2 S C_L \quad (6)$$

onde, m_2 : massa do protótipo 3; g: gravidade; ρ : densidade do ar; V_2^2 : velocidade ao quadrado do protótipo 3; S: área do aerofólio; C_L : Coeficiente de sustentação.

Com os formatos geométricos idênticos dos dois aerofólios, sendo a variação somente o método de construção, podemos eliminar as variantes similares e relacionadas a sustentação, a densidade do ar, ao coeficiente de sustentação e a gravidade, pois é a mesma para os dois aerofólios. Ao reduzir a eq. (5) e a eq. (6), com a condição do protótipo 3A ficar mais leve que o protótipo 1A, e igualando as duas teremos a eq. (7):

$$m_1 g = \frac{1}{2} \rho V_1^2 S C_L \quad (\text{Protótipo 1}) \quad (5)$$

$$m_2 g = \frac{1}{2} \rho V_2^2 S C_L \quad (\text{Protótipo 3}) \quad (6)$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{V_1^2}{V_2^2} \quad (7)$$

onde m_1 : massa do protótipo 1A; m_2 : massa do protótipo 3A; V_1^2 : velocidade ao quadrado do protótipo 1A; e V_2^2 : Velocidade ao quadrado do protótipo 3A.

Isolando a velocidade V_2 :

$$V_2 = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} V_1 \quad (8)$$

Baseado no resultado do experimento, conforme dados da Tabela 2, o protótipo do aerofólio 3A, ficou com uma redução de 22,6% quando comparado ao protótipo do aerofólio 1A. Este resultado obtido proveu robustez para validar o experimento. Assim foi possível determinar de forma quantitativa a redução de massa.

Tabela 2. Fase 6, redução da massa

AH95-160	Massa (g)	Densidade PLA (g cm ⁻³)	%	Redução (%)
Protótipo 1A	52,7	1,24	100	0,0
Protótipo 1B	52,0	1,24	98,7	1,3
Protótipo 1C	47,6	1,24	90,3	9,7
Protótipo 1D	46,4	1,24	88,0	12,0
Protótipo 2A	41,9	0,54	79,5	20,5
Protótipo 3A	40,8	0,54	77,4	22,6
Protótipo 3B	40,8	0,54	77,4	22,6

Fonte: Resultados originais da pesquisa

Substituindo os valores obtidos da Tabela 2 na eq. (8) temos:

$$V_2 = \sqrt{\frac{40,8}{52,7}} V_1$$

$$V_2 = 0,88 V_1$$

O resultado de V_2 ser $0,88V_1$, demonstra que o protótipo do aerofólio 3A, com 40,8g, obedecendo o coeficiente de sustentação, analiticamente, tende a manter a sustentação equilibrada ao peso com 12% a menos de velocidade, quando comparado ao protótipo do aerofólio 1A, com 52,7g.

Observou-se também que o material PLA utilizado tem característica higroscópica que absorveu a umidade do ar, Dicio (2013), e que sua porosidade, permitiu o vazamento do gás do interior do aerofólio, mantendo a diferença de 1,1g do protótipo 2A para o protótipo 3A, por menos que vinte e quatro horas.

5 Conclusões

Esta pesquisa teve como objetivo apresentar a gestão do ciclo de vida do projeto na produção de aerofólio. Com foco na redução de massa, abordou-se a integração de conceitos e processos, amostras para análises foram criadas, além dos cálculos realizados e as observações. Pode-se considerar que o processo utilizado para o desenvolvimento do experimento dos aerofólios foi satisfatório e positivo quanto a integração dos conceitos em ciclo de vida do projeto, ciclo de vida do produto e curva da banheira.

A gestão do desenvolvimento do projeto, o controle de qualidade e o monitoramento do experimento foram conduzidos de maneira lógica e ordenada que culminou na conclusão, com o suporte das ferramentas PDCA, diagrama de precedência, tabelas e gráficos. As entregas dos protótipos foram efetuadas dentro do prazo e do custo estimado, validando o planejamento, as sequências entre as fases do projeto e diagrama de precedência.

A execução foi conduzida de forma sequencial e otimizada, a qual foi monitorada e garantiu a qualidade das informações e do experimento, conforme proposto inicialmente. No processo de impressão em ambiente de gás hélio, foi possível obter um resultado positivo, que

validou o processo sequencial criado, abriu espaço para futuros experimentos com outros gases, materiais e métodos, além de haver margem a aperfeiçoamento com outras impressoras que possam atingir uma maior temperatura do extrusor e uma câmara com maior resistência estrutural.

Tem-se como hipótese que um tratamento superficial como pintura, possa mitigar as características higroscópicas e de porosidade. Ainda existe a hipótese, para trabalhos futuros, deste processo de aplicação de gás menos denso que o ar ter a capacidade de reduzir a propagação de som e servir como isolante térmico.

Referências

- Bigfoil.com [AH 95-160] 2021. Disponível em:
<<https://www.bigfoil.com/index.php?airfoil=dc547217-206b-4149-a24c-4bb005377a88>>.
Acesso em 06/11/2022.
- Campos, V. F. 1994. Gerenciamento da Rotina do Trabalho do Dia a Dia. 6^o ed. Editora de Desenvolvimento Gerencial, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- Cunico, Marlon Wesley Machado. 2015. Impressora 3D: o novo meio produtivo. 1^o ed. Editora Concept3D, Curitiba, PR, Brasil.
- Dicionário Online de Português [DICIO], 7Graus. 2023. Disponível em:
<<https://www.dicio.com.br/projeto/>>. Acessado em: 17/01/2023.
- Homa, Jorge M. 2009. Aerodinâmica e teoria de voo: Noções Básicas. 27^o ed. Editora Asa, São Paulo, SP, Brasil.
- Homa, Jorge M. 2009. Aeronaves e motores: Conhecimentos técnicos. 29^o ed. Editora Asa, São Paulo, SP, Brasil.
- Keeling, Ralph; Branco, Renato Henrique Ferreira. 2019. Gestão de Projetos: Uma abordagem Global. 4^o ed. Editora Saraiva, São Paulo, SP, Brasil.
- Kerzner, H. Gerenciamento de Projetos: uma abordagem sistêmica para planejamento, programação e controle. São Paulo: Blucher, 2011.
- Lawley, Brian; Schure, Pamela. 2019. Gestão de Produto: Para leigos. 1^o ed. Editora Atlas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Lira, Valdemir Martins. 2021. Processos de fabricação por impressão 3D: Tecnologia, equipamentos, estudo de caso e projeto de impressora 3D. 1^o ed. Editora Edgar Blucher Ltda, São Paulo, SP, Brasil.
- Lopes, Dario Rais; Rodrigues Filho, Oswaldo Sansone. 2021. Aeroportos: Tópicos em planejamento e projeto. 1^o ed. Editora Appris, Curitiba, PR, Brasil.
- Marcellini, Domingos. 1999. Manual Prático de Marcenaria. 8^o ed. Editora Ediouro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Project Management Institute [PMI]. 2013. Um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos. 6^o ed. Project Management Institute, Newtown Square, PA, EUA.

Prodanov, Cleber Cristiano; Freitas, Ernani Cesar. 2013. Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico. 2ª ed. Editora Feevale, Novo Hamburgo, RS, Brasil.

Sellitto, Miguel Afonso. 2005. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. Revista Produção. Volume 15: 044-059.