



ConBRepro

X CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



02 a 04
de dezembro 2020

ETAPAS INICIAIS DA METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA: APLICAÇÃO EM UM CASO DIDÁTICO

Rogério Santana Peruchi
Nathan Bezerra de Oliveira
Paulo Rotella Junior
Marcel de Góis Pinto

Departamento de Engenharia de Produção - UFPB
Tarcísio Gonçalves de Brito
Instituto de Engenharias Integradas - UNIFEI

Resumo: Este trabalho tem como objetivo apresentar um roteiro para aplicação da Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) utilizando um exemplo didático. A RSM possibilita a modelagem e otimização de processos utilizando arranjos experimentais simples e econômicos. A aplicação num caso didático combinado com o desenvolvimento de um passo a passo busca contribuir para o ensino e aprendizagem dessa ferramenta. O presente artigo abrange a parte inicial da aplicação da RSM. Primeiramente, foi selecionada a variável de resposta, bem como as variáveis de entrada e seus níveis. Em seguida, foram conduzidos os experimentos de triagem para definir os fatores que mais influenciam na resposta. Por fim, foi realizada a modelagem da região experimental.

Palavras-chave: Metodologia de Superfície de Resposta, Modelagem, Arranjos Experimentais.

INITIAL STEPS OF THE RESPONSE SURFACE METHODOLOGY: APPLICATION IN A DIDACTIC CASE

Abstract: This work aims to present a roadmap for the application of the Response Surface Methodology (RSM) using a didactic example. RSM enables the modeling and optimization of processes using simple and economical experimental arrangements. The application in a didactic case combined with the development of a step by step seeks to contribute to the teaching and learning of this tool. This article covers the initial part of the application of RSM. First, the response variable was selected, as well as the input variables and their levels. Then, the screening experiments were conducted to define the factors that most influence the response. Finally, a modeling of the experimental region was carried out.

Keywords: Response Surface Methodology. Optimization. Experimental Arrangements.

1. Introdução

No contexto atual, a competição entre empresas fica cada vez mais acirrada pelo desenvolvimento de novos produtos, novas tecnologias, e também novos processos de produção. Esses processos devem cada vez mais ter como objetivo o alcance de uma produção enxuta, reduzindo custos e desperdícios sem abrir mão de entregar uma qualidade dentro dos padrões para seus clientes. Dessa forma, controlar e melhorar processos se tornou uma importante estratégia de negócios para as organizações (MONTGOMERY, 2009).

Para se ter um domínio amplo e profundo de como o desempenho das variáveis de saída de um processo é afetado pelos diversos fatores de entrada que o compõem, é preciso conduzir experimentos para modelar o comportamento desse sistema (MONTGOMERY, 2013). Nesse sentido, uma ferramenta utilizada é a Metodologia de Superfície de Resposta, que consiste num conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas que busca, através de um bem estruturado design experimental, relacionar uma resposta (ou saída de um processo) com os níveis dos fatores (ou entradas do processo) que a influenciam (BOX & DRAPER, 2007).

Na literatura, existem diversos trabalhos publicados sobre a aplicação da RSM em diferentes áreas, o que indica a versatilidade dessa ferramenta. Gunaraj e Murugan (1999) utilizaram a RSM para modelar e prever o comportamento da qualidade do cordão de solda no processo de soldagem de canos por arco submerso. Já Seeman *et al.* (2009) estudaram o desgaste e a rugosidade de peças no processo de usinagem de um metal de matriz compósita (LM25 AlSiCp). Na área da indústria química, Baj *et al.* (2013) utilizam a metodologia para otimização de uma técnica de análise de peróxidos de silício. Ahmadzadeh *et al.* (2017) realizaram uma modelagem através da RSM do processo de eletrocoagulação por eletrodo de alumínio buscando a remoção de materiais tóxicos de resíduos hospitalares. Saad *et al.* (2019) utilizaram RSM como uma das técnicas para otimizar a rugosidade de peças fabricadas através de impressoras 3D.

No campo dos estudos utilizando exemplos didáticos aplicados na área de qualidade e otimização de processos, destaca-se os estudos de Rasis *et al.* (2002), no qual foi aplicado o roteiro DMAIC em um estudo didático para ensino da metodologia Six-Sigma. De forma semelhante, Peruchi *et al.* (2012) exploram as etapas definir e medir do DMAIC para projeto “Seis Sigma” utilizando também um caso didático. Outra aplicação desse caso didático pode ser vista no artigo publicado por Johnson *et al.* (2006). O exemplo didático utilizado como base para o desenvolvimento do experimento tratado neste artigo é o reconhecido trabalho de Box (1992), que utiliza helicópteros de papel para o ensino de design experimental.

O objetivo deste artigo, então, é aplicar a Metodologia de Superfície de Resposta em um exemplo didático, buscando desenvolver um roteiro e fornecer uma experiência consolidada para o ensino e aprendizagem da metodologia RSM, focado na otimização de processos, bem como facilitar sua replicação em casos reais, seja para fins acadêmicos ou industriais. O método utilizado para condução deste trabalho é o experimental.

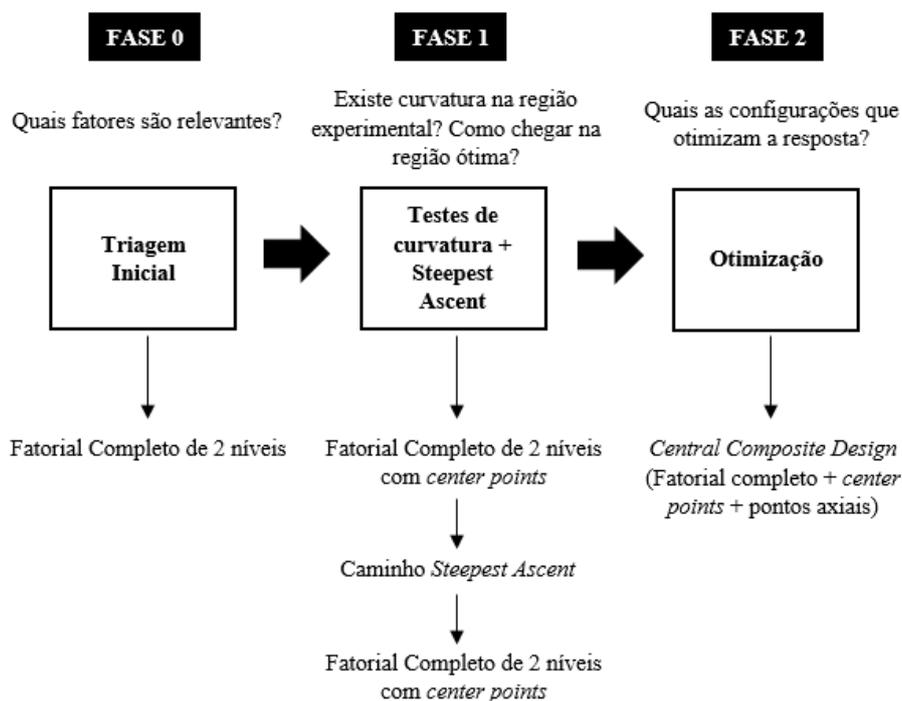
2. Materiais e métodos

A Metodologia de Superfície de Resposta possui uma natureza sequencial (MONTGOMERY, 2009), conforme resumido na Figura 1. Nela, pode-se identificar a pergunta que cada fase busca responder, bem como quais arranjos experimentais são mais comumente utilizados em cada uma delas. No presente artigo será apresentada a Fase 0, que consiste nos Experimentos de Triagem, e o Teste de Curvatura (ou modelagem da região experimental), que faz parte da Fase 1 da RSM.

Num um processo qualquer, existem vários fatores ou entradas que influenciam na saída desse processo. Contudo, alguns desses fatores possuem uma influência não significativa no resultado final. Dessa forma, os Experimentos de Triagem (Fase 0) são importantes para filtrar e reduzir o número de fatores, proporcionando um melhor foco dos esforços e simplificação do modelo.

Dessa forma, inicialmente são definidas as várias de resposta (y), que devem ser aquelas características essenciais para o desempenho do produto final, bem como as variáveis de entrada (x), que são as entradas do processo e podem ser controladas. Após isso, define-se o arranjo experimental e é feito o planejamento do experimento. Por fim, realiza-se a coleta de dados e as análises estatísticas necessárias.

Figura 1 - Fases da RSM



Fonte: Adaptado de Joyce et al. (2013)

Já na Fase 1, o primeiro objetivo é avaliar se o processo estudado está operando perto ou longe da região ótima, ou seja, a região na qual o desempenho é máximo possível. Primeiramente, será definido um novo arranjo experimental, apenas com as variáveis de entrada obtidas na Fase 0 e seus respectivos níveis, adicionando-se center points para completar o arranjo. Após a coleta de dados, as análises estatísticas são realizadas, com especial atenção ao teste de curvatura da região: caso não exista uma curvatura, podemos entender que aquela região não é a ótima, pois não possui ponto de máximo ou mínimo. Dessa forma, através de mudanças nos parâmetros de entrada, é possível melhorar o desempenho da variável de resposta.

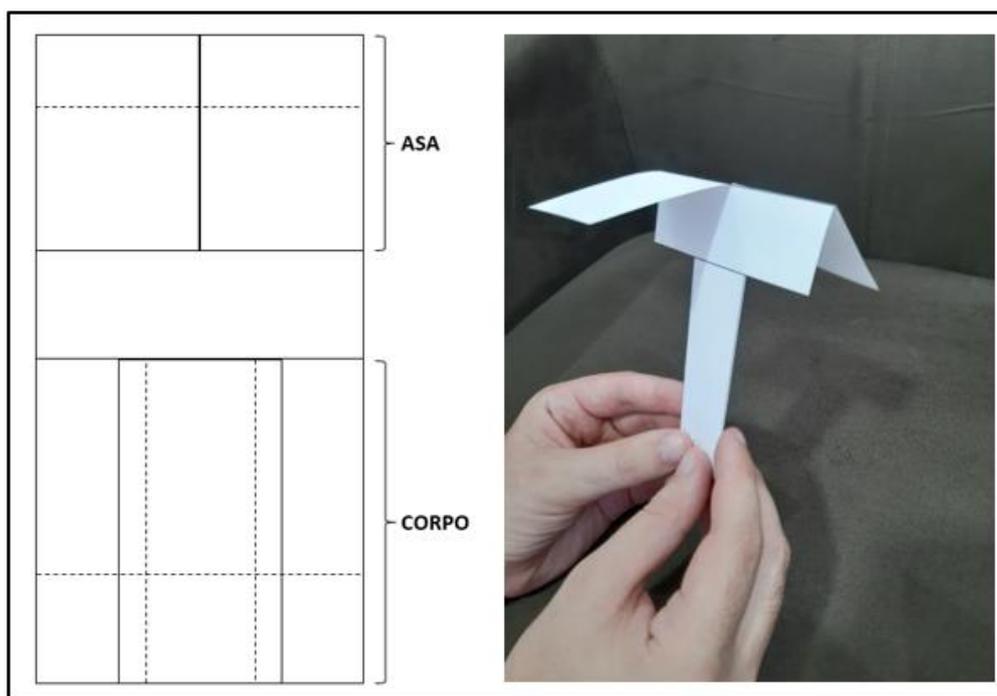
Uma vez que uma curvatura não é constatada, utiliza-se o método *Steepest Ascent* para projetar uma sequência de "passos" em busca da região de máxima ascensão da resposta. Caso o problema estudado busque a minimização de uma variável, o método chama-se *Steepest Descent*.

O caso didático objeto deste trabalho é uma adaptação do reconhecido experimento que utiliza helicópteros de papel para experimentação e análises estatísticas.

Utilizando técnicas e materiais simples para confecção, os helicópteros simulam um processo que possui diferentes parâmetros construtivos (entradas) e resultados esperados (saídas). Na Figura 2 está apresentado o modelo utilizado para montagem do helicóptero.

Os helicópteros podem ser impressos em folhas de papel comum e, após alguns cortes e dobras, estão prontos para o experimento. Então, são feitos “lançamentos” a partir de uma determinada altura, dos quais é possível extrair resultados como o tempo que o helicóptero levou para chegar ao solo e a distância do ponto de aterrissagem até algum alvo marcado previamente.

Figura 2 – Modelo do helicóptero de papel



Fonte: Os autores (2020)

Para uniformizar o experimento de uma forma geral, foram desenvolvidos procedimentos operacionais padrão (POP's) para a fabricação das aeronaves, medição da resposta e realização dos lançamentos, conforme apresentado nas tabelas a seguir.

Tabela 1 - Procedimento Operacional Padrão para confecção das aeronaves

Tarefa	Fabricação das aeronaves
Resultados esperados	Aeronaves confeccionadas e prontas para condução dos experimentos de acordo com as medidas especificadas no arranjo experimental
Recursos necessários	Papel sulfite, tesoura, impressora
Sequência de atividades	1º Passo Ajustar as medidas do helicóptero de acordo com os níveis a serem testados
	2º Passo Imprimir as aeronaves
	3º Passo Fazer os cortes e dobras nos locais indicados
Cuidados	Armazenar aeronaves de forma que não fiquem dobradas ou amassadas.

Tabela 2 - Procedimento Operacional Padrão para medição da resposta

Tarefa	Medição do tempo queda da aeronave
Resultados esperados	Dados coletados com precisão para realização das análises estatísticas
Recursos necessários	Cronômetro, operadores
Unidade de medição	Segundos (s)
Sequência de atividades	1° Passo Zerar cronômetro
	2° Passo Iniciar cronometragem no instante em que a aeronave for lançada
	3° Passo Parar cronômetro no instante do toque no solo
	4° Passo Ler o tempo em voz alta para que outro operador faça o registro dos dados
Cuidados	Invalidar teste no qual o lançamento for dessincronizado com a cronometragem

Tabela 3 - Procedimento Operacional Padrão para realização dos lançamentos

Tarefa	Realização dos testes do experimento		
Resultados esperados	Testes conduzidos dentro das especificações experimentais e dados coletados para análises estatísticas		
Recursos necessários	Helicópteros de papel, operadores		
Sequência de atividades	Passos	Descrição	Objetivo
	1° Passo: Escolha do local	Escolher ambiente fechado e livre de obstáculos	Minimizar efeitos externos como as correntes de ar
	2° Passo: Definir ponto de lançamento	Definir uma altura padrão para o lançamento das aeronaves	Padronizar pontos importantes para os lançamentos
	3° Passo: Definir funções	Função 1: Realizar os lançamentos Função 2: Medir tempo de queda Função 3: Registrar dados	Padronizar atividades dos experimentadores envolvidos
4° Passo: Realizar lançamentos	Invalidar teste em que a aeronave atinja algum obstáculo	Repetir testes que tenham sofrido alguma influência externa	
Cuidados	Invalidar testes fora do padrão	Invalidar teste no qual o lançamento tenha sido incorreto	
		Invalidar teste em que a aeronave atinja algum obstáculo	

Fonte: Os autores (2020)

3. Resultados e discussão

3.1 Experimentos para triagem de fatores

Esta pesquisa foi desenvolvida, primordialmente, para solucionar um problema de otimização do helicóptero de papel, utilizando o método RSM. O processo estudado é o lançamento desses helicópteros a partir de uma certa altura em direção a um alvo previamente demarcado no solo.

Nessa fase inicial, a busca é por definir as variáveis de resposta interessantes para o estudo, bem como os fatores que podem influenciar nessas respostas e seus respectivos níveis. Devido a quantidade de fatores, é necessário fazer uma triagem nesses fatores para seleção dos mais relevantes para o prosseguimento da aplicação do método.

No caso do helicóptero, podem-se elencar algumas variáveis que são de interesse nesse processo, como o tempo de queda, distância para o alvo demarcado, dentre outras. A variável escolhida para o presente estudo é o tempo de queda, ou seja, o tempo em segundos (s) que a aeronave fica no ar a partir do lançamento até o toque no solo. Intuitivamente, quanto mais tempo a aeronave permanecer no ar, melhor. Na Tabela 4 está formalizada a escolha dessa variável.

Variável	Descrição	Unidade	Instrumento de medição
Tempo	Tempo de queda do helicóptero, medido do momento que o lançamento é realizado até o toque no solo.	Segundos (s)	Cronômetro

Fonte: Os autores (2020)

Já com relação às variáveis de entrada, existem uma série de parâmetros construtivos que podem ser modificados. Dentre eles, o tipo de papel utilizado, medidas do corpo e da asa do helicóptero e a utilização ou não de cliques e fitas para melhorar a estabilidade. Para este estudo, estão definidos na Tabela 5 os fatores selecionados para integrar essa primeira fase, com 2 níveis (- e +) para cada.

Variáveis de controle	Síglas	Unidade	Nível -	Nível +
Tipo de Papel	Tipo Papel	-	Leve	Pesado
Largura do corpo	Larg.Corpo	mm	30	45
Comprimento do corpo	Comp.Corpo	mm	60	90
Comprimento da asa	Comp.Asa	mm	40	60

Fonte: Os autores (2020)

Para a variável Tipo de Papel, foram selecionadas duas gramaturas diferentes. Uma de papel A4 comum, outra de papel sulfite mais pesado. Quanto às variáveis largura do corpo, comprimento do corpo e comprimento da asa, os níveis selecionados foram escolhidos de forma razoável para se encaixar nas medidas de uma folha A4, bem como para ter margem de aumento dessas medidas quando da realização do Steepest Ascent, facilitando assim a sua replicação num ambiente de aprendizagem e visando a economicidade do experimento.

O arranjo experimental escolhido é o fatorial completo com apenas uma réplica. Seguidos todos os procedimentos, o experimento foi realizado, e os dados coletados podem ser observados na Tabela 6. Todos as unidades de Larg.Corpo, Comp.Corpo e Comp.Asa estão em milímetros (mm).

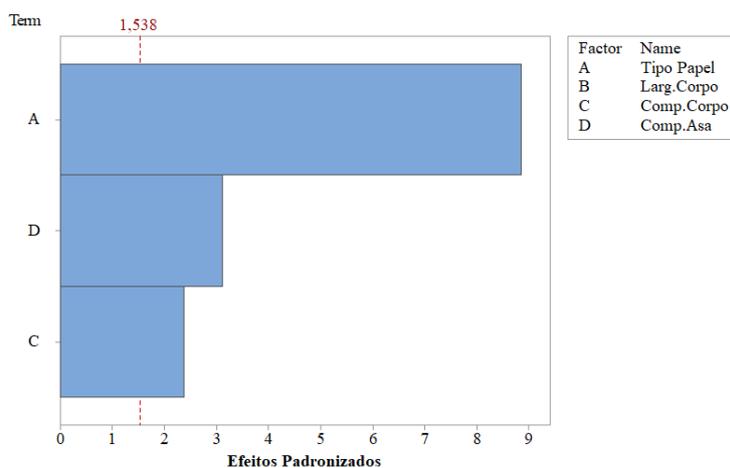
Tabela 6 – Arranjo experimental e dados coletados

Ordem Padrão	Ordem dos Testes	Tipo Papel	Larg.Corpo	Comp.Corpo	Comp.Asa	Tempo
1	3	Leve	30	60	40	1,57
2	1	Pesado	30	60	40	1,07
3	16	Leve	45	60	40	1,76
4	14	Pesado	45	60	40	1,03
5	5	Leve	30	90	40	1,55
6	13	Pesado	30	90	40	0,93
7	2	Leve	45	90	40	1,42
8	12	Pesado	45	90	40	0,90
9	4	Leve	30	60	60	2,04
10	11	Pesado	30	60	60	1,45
11	15	Leve	45	60	60	1,74
12	6	Pesado	45	60	60	1,00
13	10	Leve	30	90	60	1,60
14	8	Pesado	30	90	60	1,13
15	7	Leve	45	90	60	1,67
16	9	Pesado	45	90	60	1,22

Fonte: Os autores (2020)

A partir dos dados coletados, foi realizada uma análise estatística do arranjo fatorial para determinar a significância da influência dos fatores no tempo de queda. Primeiramente, é apresentado na Figura 3 o Gráfico de Pareto para a variável Tempo, cujo cálculo do nível mínimo de significância foi realizado através do método de Lenth.

Figura 3 - Gráfico de Pareto para o Tempo



Fonte: Os autores (2020)

A partir do gráfico, é possível concluir que, para a resposta Tempo, o tipo de papel, o comprimento do corpo e o comprimento da asa são fatores significativos, pois os efeitos estão acima do nível de significância.

Outras análises estatísticas importantes para validar o modelo, como a análise de variância (ANOVA) e o coeficiente de determinação (R^2 -adj), podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7 – Análises estatísticas

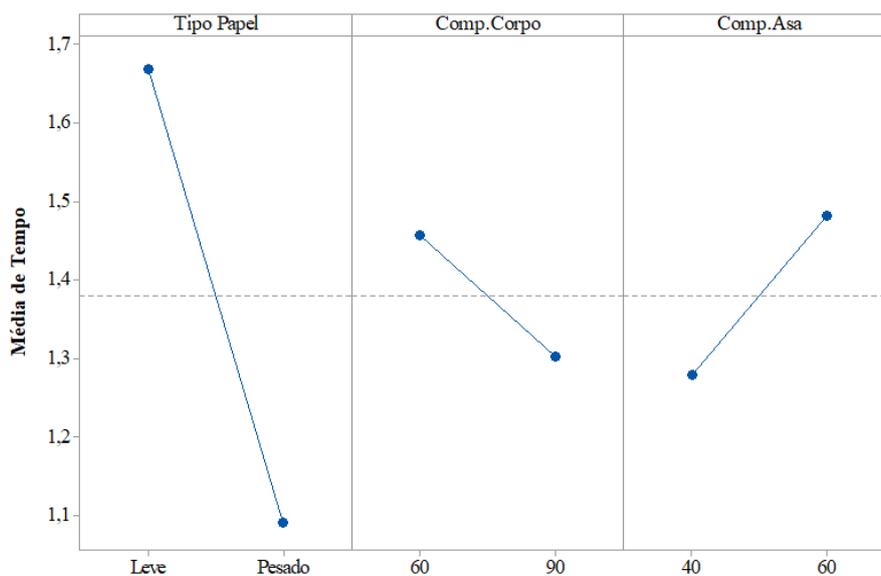
Análise de Variância					
Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Model	3	1,59415	0,53138	31,34	0,000
Linear	3	1,59415	0,53138	31,34	0,000
Tipo Papel	1	1,33402	1,33402	78,68	0,000
Comp.Corpo	1	0,09610	0,09610	5,67	0,035
Comp.asa	1	0,16402	0,16402	9,67	0,009
Error	12	0,20345	0,01695		
Total	15	1,79760			
Sumário do Modelo					
S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)		
0,130208	88,68%	85,85%	79,88%		

Fonte: Os autores (2020)

Na análise de variância, visto que o p-value está abaixo de 0,05, podemos confirmar a significância dos fatores. Já o R^2 -adj, que indica um percentual de 85,85%, garante uma boa representatividade dos resultados e do modelo.

Em seguida, foram realizadas as análises gráficas. Na Figura 4 está demonstrado os resultados dos gráficos de efeitos principais para o Tempo. Nessa análise, é possível identificar que, para a resposta Tempo, cujo objetivo é a maximização, a melhor configuração é utilizar o papel leve, com o comprimento do corpo de 60mm e comprimento da asa de 60mm.

Figura 4 – Gráfico de efeitos principais



Fonte: Os autores (2020)

Sendo assim, podemos afirmar que a Fase 0 foi concluída e seus resultados foram validados pelas análises estatísticas e alcançando o principal objetivo, que é a triagem dos fatores.

Para a variável de resposta escolhida (tempo), os fatores que têm uma influência significativa no resultado são: Tipo de Papel, Comprimento do Corpo e Comprimento da Asa.

Também foi possível extrair do experimento quais níveis dos fatores que melhoram o desempenho da resposta entre os níveis testados. Porém, não é possível afirmar que estes são os níveis que otimizam a resposta, ou seja, os melhores níveis possíveis. Recomenda-se então a continuação do estudo completo para que seja alcançada essa resposta.

3.2 Experimentos para avaliar a curvatura da região experimental

Nesta fase, nos encontramos inicialmente com três fatores significantes. Então será projetado um novo arranjo, novos protótipos serão confeccionados e os testes serão executados, buscando definir qual a posição atual do desempenho do helicóptero em relação à região ótima.

O fator tipo de papel possui dois níveis: leve e pesado. O fato dessa variável não ser numérica dificulta sobremaneira a continuidade do experimento, em especial na aplicação do método Steepest Ascent, pois iria requerer a utilização de várias gramaturas de papel diferente, a maioria delas que nem sequer são comercializadas, tornando impraticável sua replicação num ambiente didático. Dessa forma, esse fator será mantido fixo nesta etapa. Conforme o gráfico de efeitos principais apresentado na Figura 4, o papel leve possui um desempenho melhor para a resposta Tempo, por isso essa será a configuração utilizada.

Sendo assim, utilizaremos nessa fase apenas as variáveis comprimento do corpo e comprimento da asa, adicionando-se ao arranjo três réplicas do ponto central, que é de 75mm e 50mm, respectivamente. Dessa forma, é possível realizar o teste de curvatura.

Definidos os fatores e níveis, seleciona-se o arranjo experimental, que será novamente, o fatorial completo. Na Tabela 8 estão resumidos os fatores e níveis utilizados nesta etapa, bem como a coleta de dados realizada.

Tabela 8 - Arranjo experimental e dados coletados

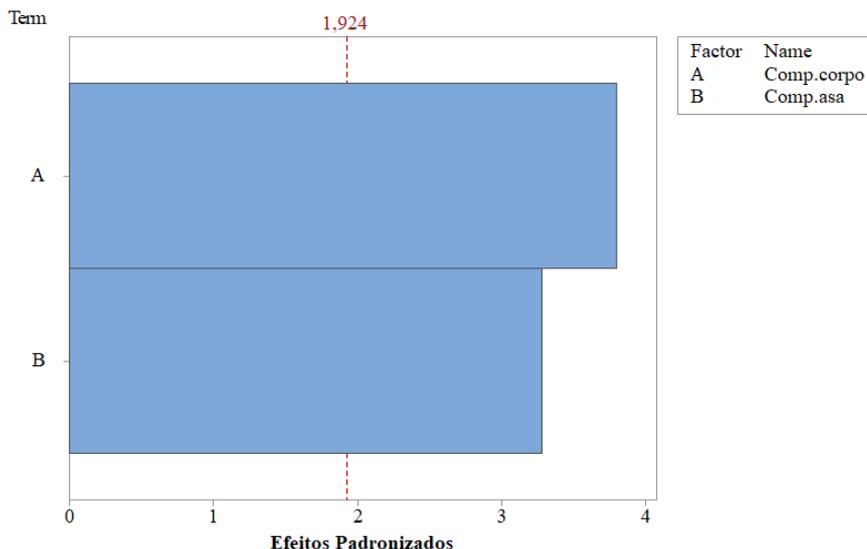
Ordem Padrão	Ordem dos Testes	Center Point	Comp.Corpo	Comp.Asa	Tempo
1	1	1	60	40	1,66
2	2	1	90	40	1,48
3	3	1	60	60	1,89
4	4	1	90	60	1,63
5	5	0	75	50	1,62
6	6	0	75	50	1,49
7	7	0	75	50	1,55

Fonte: Os autores (2020)

Coletados os dados, a análise do arranjo fatorial foi realizada. Primeiramente, deve-se verificar a significância e a validação do modelo. Então, está apresentado na Figura 5 o Gráfico de Pareto para a resposta Tempo. Analisando o gráfico, pode-se concluir que as

variáveis comprimento do corpo e comprimento da asa são sim significantes para o desempenho da resposta.

Figura 5 - Gráfico de Pareto



Fonte: Os autores (2020)

Em seguida, para validação do modelo, foram realizadas as análises estatísticas, apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Análise de regressão

Análise de Regressão (Tempo vs Comp.Corpo; Comp.asa; CenterPt)						
Análise de Variância						
Fonte		DF	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Model		3	0,105876	0,035292	10,52	0,042
	Linear	2	0,084500	0,042250	12,59	0,035
	Comp.Corpo	1	0,048400	0,048400	14,42	0,032
	Comp.asa	1	0,036100	0,036100	10,76	0,046
	Curvature	1	0,021376	0,021376	6,37	0,086
Error		3	0,010067	0,003356		
	Lack-of-Fit	1	0,001600	0,001600	0,38	0,601
	Pure Error	2	0,008467	0,004233		
Total		6	0,115943			
Sumário do Moelo						
	S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)		
	0,0579272	91,32%	82,64%	61,49%		
Coefficientes Codificados						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		1,6650	0,0290	57,49	0,000	
Comp.corpo	-0,2200	-0,1100	0,0290	-3,80	0,032	1,00
Comp.asa	0,1900	0,0950	0,0290	3,28	0,046	1,00
Ct Pt		-0,1117	0,0442	-2,52	0,086	1,00

Fonte: Os autores (2020)

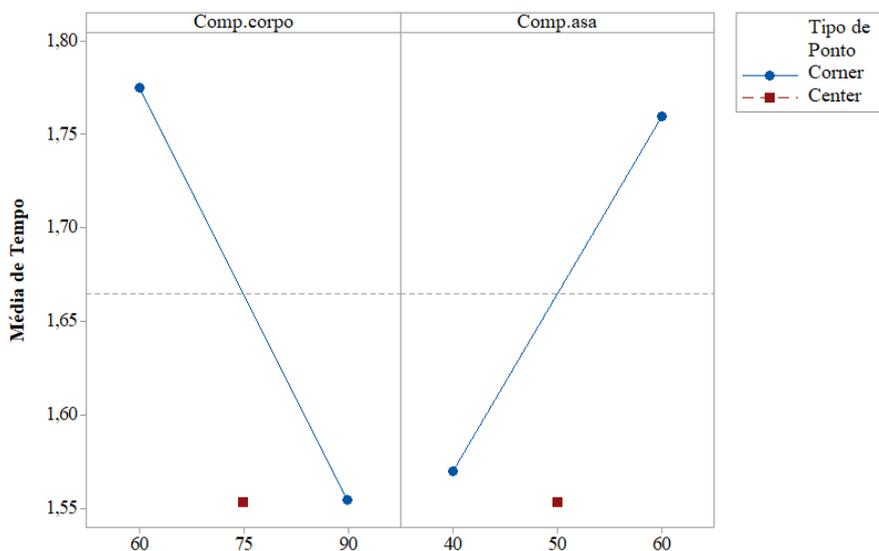
Dessa análise, algumas informações importantes podem ser verificadas:

- o índice de representatividade dos resultados (R^2 -adj) indica um percentual de 82,64%;
- o p-value abaixo de 0,05 nas variáveis Comp.corpo e Comp.asa confirma a significância dessas variáveis;

- o p-value acima de 0,05 na curvatura indica que esta não é significativa, ou seja, não é uma região de ponto máximo;
- os coeficientes das variáveis Comp.corpo e Comp.asa são, respectivamente, -0,11 e 0,095 (esta informação será utilizada na aplicação do método Steepest Ascent).

Em seguida, foi gerado o gráfico de efeitos principais, que podem ser observados na Figura 6.

Figura 6 – Gráfico de efeitos principais



Fonte: Os autores (2020)

Conforme já verificado na Fase 0 e agora confirmado, para a resposta Tempo, a configuração que melhora o desempenho é o comprimento do corpo de 60mm e comprimento da asa também de 60mm. Também é possível verificar que, no ponto central, existe uma curvatura que, além de não ser estatisticamente significativa, não é de interesse, pois é no sentido negativo do desempenho.

4. Conclusões

Este artigo abordou as primeiras etapas da aplicação da Metodologia de Superfície de Resposta (RSM), que são a Triagem de Fatores e o Teste de Curvatura da região experimental. As etapas citadas foram aplicadas utilizando como objeto de estudo um exemplo didático. Essa metodologia mostra-se uma importante ferramenta para modelagem e otimização de processos. A partir do passo a passo percorrido na aplicação dessa fase inicial, é possível tirar as seguintes conclusões:

- Das variáveis de entrada identificadas, o comprimento do corpo do helicóptero (Comp.Corpo) e o comprimento da asa (Comp.Asa) são as variáveis que influenciam de forma mais significativa no desempenho da variável de saída, o tempo de queda;
- Na região experimental atual do processo não foi identificada uma curvatura de interesse, o que indica que é possível otimizar o desempenho da variável de resposta;
- O passo a passo seguido para a aplicação do método cria um roteiro para futuras aplicações, seja num ambiente de aprendizagem ou em casos reais.

A continuação da aplicação da RSM no exemplo didático do helicóptero de papel será abordada em um artigo posterior. Nas etapas finais, é feita a busca pela região ótima de operação através do método Steepest Ascent e a modelagem dessa região através de

um modelo quadrático completo, sendo possível, então, identificar a combinação de parâmetros que otimiza o desempenho do helicóptero.

Referências

AHMADZADEH, S.; ASADIPOUR, A.; POURNAMDARI, M.; BEHNAM, B.; RAHIMI, H. R.; DOLATABADI, M. Removal of ciprofloxacin from hospital wastewater using electrocoagulation technique by aluminum electrode: Optimization and modelling through response surface methodology. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 109, p. 538-547, 2017.

BAJ, S., SŁUPSKA, R., KRAWCZYK, T. Application of response surface methodology (RSM) to the optimization of a post-column luminol chemiluminescence analysis of silyl peroxides. **Talanta**, v. 103, p. 172-178, 2013.

Box, G. E. P. Teaching engineers experimental design with a paper helicopter. **Quality Engineering**, v. 4, p. 453–459, 1992.

Box, G. E. P., Draper, N. R. **Response Surfaces, Mixtures and Ridge Analyses**. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2007.

GUNARAJ, V.; MURUGAN, N. Application of response surface methodology for predicting weld bead quality in submerged arc welding of pipes. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 88, p. 266–275, 1999.

JOHNSON, J. A., WIDENER, S., GITLOW, H., POPOVICH, E. A “Six Sigma” Black Belt Case Study: G.E.P. Box’s Paper Helicopter Experiment. **Quality Engineering**, Vol.18, p.413-430, 2006.

JOYCE, A. P.; LEUNG, S. S. Use of response surface methods and path of steepest ascent to optimize ligand-binding assay sensitivity. **Journal of Immunological Methods**, v. 392, p. 12-23, 2013.

Montgomery, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8th ed. John Wiley & Sons, 2013.

Montgomery, D. C. **Introduction to Statistical Quality Control**. 6th ed. John Wiley & Sons, 2009.

PERUCHI, R. S.; BALESTRASSI, P. P.; CARMELOSSI, M. S.; MAIA, P.R. Aplicação das etapas definir e medir do roadmap DMAIC para um exemplo didático de projeto Seis Sigma. **Anais - XXXII ENEGEP – Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Bento Gonçalves, 2012.

RASIS, D.; GITLOW, H. S.; POPOVICH, E. Paper Organizers International: A Fictitious Six Sigma Green Belt Case Study. **Quality Engineering**, v. 15, n. 1, p. 127-145, 2002.

SAAD, M. S.; NOR, A. M.; BAHARUDIN, M. E.; ZAKARIA, M. Z.; AIMAN, A. F. Optimization of surface roughness in FDM 3D printer using response surface methodology, particle swarm optimization, and symbiotic organism search algorithms. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, p. 5121–5137, 2019.

SEEMAN, M.; GANESAN, G.; KARTHIKEYAN, R.; VELAYUDHAM, A. Study on tool wear and surface roughness in machining of particulate aluminum metal matrix composite-response surface methodology approach. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v.48 p. 613–624, 2009.