

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

FUNDAMENTOS DA METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE
RESPOSTA E SUAS APLICAÇÕES EM MANUFATURA
AVANÇADA: UMA ANÁLISE CRÍTICA

Lucas Guedes de Oliveira

Itajubá, Fevereiro de 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Lucas Guedes de Oliveira

FUNDAMENTOS DA METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE
RESPOSTA E SUAS APLICAÇÕES EM MANUFATURA
AVANÇADA: UMA ANÁLISE CRÍTICA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como requisito à obtenção do título de *Mestre em Ciências em Engenharia de Produção*.

Área de concentração: Qualidade e Produto

Orientador: Prof. Anderson Paulo de Paiva, Dr.

Fevereiro de 2018

Itajubá

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Lucas Guedes de Oliveira

FUNDAMENTOS DA METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE
RESPOSTA E SUAS APLICAÇÕES EM MANUFATURA
AVANÇADA: UMA ANÁLISE CRÍTICA

Dissertação aprovada por banca examinadora em 15 de
Fevereiro de 2018, conferindo ao autor o título de
Mestre em ciências em Engenharia de Produção.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva (Orientador)

Prof. Dr. Emerson José de Paiva (UNIFEI)

Prof. Dr. Paulo Henrique da Silva Campos (UNIFEI)

Prof. Dr. Ronã Rinston Amaury Mendes (IF SUL DE
MINAS)

Itajubá

2018

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Jorge e Luzia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sua maravilhosa graça, através da qual sou presenteado com as mais preciosas bênçãos.

Aos meus pais, Jorge e Luzia, pela genuína expressão de amor com que se dedicaram e continuam se dedicando a minha vida e pelos exemplos de conduta que me orientam em todos os meus caminhos.

A minha namorada, Camila, e a sua família por todo apoio e carinho.

Ao meu orientador, Prof. Anderson Paiva, pela generosidade, pelo companheirismo, pela amizade, pelas orientações e por todos os ensinamentos.

Ao Prof. Paulo Campos e a sua esposa Fabrícia, pelo carinho com que me receberam em Itajubá e pelo apoio em todos os momentos.

Ao Prof. Carlos Oliveira e a sua esposa Cecília, pelo apoio que me deram antes mesmo de ter ingressado no curso de mestrado.

Aos professores Carlos Mello, Edson Pamplona, Gonzaga, João Roberto, José Arnaldo, José Henrique, José Leonardo, Pedro Paulo, Rafael Leme, Turrioni e a todos os professores do Instituto de Engenharia de Produção e Gestão pela consideração e, em especial, ao Prof. Carlos Sanches, pelo apoio e pelo incentivo desde os tempos de graduação.

A todos os professores do Campus de Itabira e, em especial, aos professores Emerson Paiva, José Lacerda, Rogério Brito e Sandra Neves por terem acreditado e confiado em meu trabalho durante o curso de Engenharia e me incentivado a ingressar na pós-graduação.

A todos os amigos do GEPE de Qualidade e Produtos e, em especial, aos amigos Betânia Mafra, Julio Mosquera, Juliana Gaudêncio e Mariangela Abans, que,

além de todo o companheirismo ao longo do curso, também se fizeram presentes no dia da defesa.

Ao Prof. Ronã Mendes pela disponibilidade em participar da banca como examinador externo.

A todos os amigos, técnicos e demais funcionários da UNIFEI.

À CAPES, à FAPEMIG, ao CNPq e à UNIFEI.

EPÍGRAFE

*Feliz o homem que acha sabedoria, e o
homem que adquire conhecimento.
(Provérbios 3:13)*

RESUMO

A otimização de processos industriais é um ramo de pesquisa que envolve a combinação de inúmeras técnicas matemáticas e estatísticas. Embora tenham surgido diferentes abordagens ao longo dos anos, a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) se consagrou como uma das formas mais eficazes de se conduzir estudos do gênero, ao combinar o planejamento e análise de experimentos, as técnicas de modelagem e os métodos de otimização. Apesar disso, na medida em que os anos se passaram, a literatura parece ter se distanciado de seu escopo original, negligenciando etapas importantes e demonstrando algumas incompreensões da metodologia. Aliado a isso, diversos estudos demonstraram a influência de alguns aspectos sobre a qualidade de análises da MSR. Nesse sentido, a fim de avaliá-los empiricamente, o presente trabalho visa elaborar um diagnóstico de aplicações, a partir do levantamento de estudos da área de manufatura. Como resultados, foi observado que a maior parte dos modelos apresenta formato de sela, correlação significativa com seus pares e incompatibilidade entre convexidade e sentido de otimização, embora a maioria dos estudos não se utilize de restrições do espaço experimental nem de técnicas multivariadas. Além disso, foi constatado que grande parcela das funções em formato de sela é oriunda da estimativa de modelos em regiões sem curvatura, o que revela os efeitos matemáticos da inobservância de um pressuposto estatístico. Também foi verificado que os pontos centrais são comumente alterados e que, de fato, os processos de manufatura podem ser controlados por, no máximo, cinco parâmetros de controle.

Palavras-chave: Metodologia de Superfície de Resposta (MSR); Planejamento de Experimentos (DoE); Arranjo Composto Central (CCD); Manufatura Avançada.

ABSTRACT

Optimization of industrial processes is a research branch that involves the combination of numerous mathematical and statistical techniques. Although different approaches have emerged over the years, the Response Surface Methodology (RSM) has been established as one of the most effective ways of conducting this type of studies by combining design and analysis of experiments, modeling techniques and optimization methods. Nevertheless, as the years have gone by, literature seems to have distanced itself from its original scope, neglecting important steps and demonstrating some misunderstanding of methodology. In addition, several studies have demonstrated the influence of some aspects on the quality of RSM analysis. In this sense, in order to evaluate them empirically, the present work aims to elaborate a diagnosis of applications, from a survey of manufacturing studies. As results, it was observed that most of the models presented saddle format, significant correlation with their pairs and incompatibility between convexity and optimization direction, although most of the studies did not use experimental space constraints or multivariate techniques. In addition, it was found that a large part of the functions in saddle format comes from models estimated in regions with no curvature, which reveals the mathematical effects of nonobservance of a statistical assumption. It has also been found that center points are commonly modified and that, in fact, manufacturing processes can be controlled by a maximum of five control parameters.

Keywords: Response Surface Methodology (RSM); Design of Experiments (DoE); Central Composite Design (CCD); Advanced Manufacturing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Comparação entre os conceitos de região operacional e região de interesse.....	1
Figura 1.2 - Componentes técnicos da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), sequência geral de execução e descrição resumida de seus objetivos.....	3
Figura 1.3 - Visão detalhada das interseções entre os componentes técnicos e os aspectos críticos da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR).....	5
Figura 2.1 - Roteiro para condução da Metodologia de Superfície de Resposta.....	11
Figura 2.2 - Exemplos de arranjos fatoriais completos com dois níveis em cada fator ou variável de entrada.....	13
Figura 2.3 - Visão esquemática do arranjo composto central.....	14
Figura 2.4 - Visão esquemática do processo de identificação da região de curvatura utilizando- se do Método do Vetor Gradiente.....	15
Figura 2.5 - Variância escalada de previsão para diferentes quantidades de pontos centrais ..	19
Figura 2.6 - Formato das superfícies, gráficos de contorno e pontos estacionários	22
Figura 2.7 - Relação entre convexidade das funções, sentido de otimização do problema e restrição do espaço experimental.....	26
Figura 2.8 - Diagrama de causa e efeito para fatores influentes sobre a rugosidade superficial de peças usinadas.....	28
Figura 4.1 - Número de artigos publicados por ano nos periódicos de maior densidade sobre Metodologia de Superfície de Resposta e Arranjo Composto Central	33
Figura 4.2 - Categorização dos trabalhos disponíveis em cada ano	35
Figura 5.1 - Resultado do Teste Qui-Quadrado para o número de variáveis de entrada.....	44
Figura 5.2 - Resultado do teste para a proporção de pares correlacionados.....	52
Figura 5.3 - Correlação observada entre modelos da área de manufatura.....	53
Figura 5.4 - Resultado do teste para a proporção de modelos em regiões de curvatura.....	55
Figura 5.5 - Resultado do teste para associação entre curvatura e convexidade	56
Figura 5.6 - Resultado do Teste Qui-Quadrado para o número de modelos em cada categoria de convexidade	58
Figura 5.7 - Resultado do teste para a proporção de modelos em formato de sela	60
Figura 5.8 - Resultado do teste para associação entre rotacionalidade e convexidade	61
Figura 5.9 - Resultado do teste para associação entre tipo de modelo e convexidade	62

Figura 5.10 - Resultado do teste para a proporção de funções côncavas que resultam de modelos quadráticos completos	63
Figura 5.11 - Distribuição dos modelos estudados segundo o sentido de otimização.....	64
Figura 5.12 - Resultado do Teste Qui-Quadrado para o número de modelos nas principais categorias de otimização.....	65
Figura 5.13 - Convexidade dos modelos estudados segundo o sentido de otimização	66
Figura 5.14 - Representações geométricas do arranjo fatorial com pontos centrais para as variáveis de respostas medidas no processo investigado.....	71
Figura 5.15 - Análise de Variância para o Desgaste da Ferramenta (μm).....	72
Figura 5.16 - Análise de Variância para o Cavaco de Saída (μm)	72
Figura 5.17 - Média das respostas medidas nos pontos fatoriais e axiais	73
Figura 5.18 - Modelo estimado para o Degaste da Ferramenta (Y1)	76
Figura 5.19 - Modelo estimado para o Cavaco de Saída (Y2)	77
Figura 5.20 - Superfície de Resposta para o Desgaste da Ferramenta (Y1).....	77
Figura 5.21 - Gráfico de Contorno para o Desgaste da Ferramenta (Y1)	78
Figura 5.22 - Superfície de Resposta para o Cavaco de Saída (Y2).....	78
Figura 5.23 - Gráfico de Contorno para o Cavaco de Saída (Y2)	79
Figura 5.24 - Modelo estimado para PC1	80
Figura 5.25 - Modelo estimado para PC2.....	81
Figura 5.26 - Fronteira de Pareto obtida da combinação PCA-NBI.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Teste para proporções de experimentos compatíveis com a literatura por tipologia de pontos e número de variáveis de entrada (VE) ^a	46
Tabela 5.2 - Mediana e intervalo interquartil para a quantidade de experimentos usada nos trabalhos analisados por tipologia de pontos e número de variáveis de entrada (VE) em cada um dos anos	47
Tabela 5.3 - Testes de hipóteses para o número de variáveis de resposta por tipo de processo de manufatura	49
Tabela 5.4 - Níveis dos parâmetros selecionados.....	68
Tabela 5.5 - Arranjo fatorial com pontos centrais para o processo de usinagem ultrassônica investigado.....	69
Tabela 5.6 - Mensuração das respostas de interesse em processo de usinagem ultrassônica a partir de um arranjo fatorial com pontos centrais.....	70
Tabela 5.7 - Arranjo experimental CCD para o processo de usinagem ultrassônica de materiais cerâmicos investigado.....	74
Tabela 5.8 - Arranjo experimental CCD para o processo de usinagem ultrassônica de materiais cerâmicos investigado contendo todas as respostas	75
Tabela 5.9 - Análise de autovalores da matriz de correlação	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Questões de pesquisa, hipóteses do problema e correspondência aos fundamentos e aos resultados da pesquisa	30
Quadro 5.1 - Aplicações de manufatura avançada utilizadas na análise	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
BBD	Arranjo Box-Behnken ou <i>Box-Behnken Design</i>
CCD	Arranjo Composto Central ou <i>Central Composite Design</i>
DOE	Planejamento de Experimentos ou <i>Design of Experiments</i>
EWR	Razão de Desgaste dos Eletrodos ou <i>Electrode Wear Rate</i>
GRG	Gradiente Reduzido Generalizado
IJAMT	<i>International Journal of Advanced Manufacturing Technology</i>
NBI	Método Interseção Normal a Fronteira
MRR	Taxa de Remoção de Material ou <i>Material Removal Rate</i>
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
OLS	Mínimos Quadrados Ordinários ou <i>Ordinary Least Squares</i>
PC	Componente Principal ou <i>Principal Component</i>
PCA	Análise de Componentes Principais ou <i>Principal Component Analysis</i>
SPV	Variância Escalada de Previsão ou <i>Scaled Prediction Variance</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

f	Avanço
V_c	Velocidade de corte
a_p	Profundidade de corte
y	Resposta medida, valor assumido por uma função ou modelo estimado
β	Coefficiente do modelo matemático estimado
x	Variáveis independentes
ε	Erro experimental ou resíduo
N	Número total de experimentos
k	Número de fatores ou variáveis de entrada
n_c	Número de pontos centrais
a	Distância dos pontos centrais aos pontos axiais
n_F	Número de pontos fatoriais
SQ	Soma de quadrados
MQ	Média de quadrados
F_0	Estatística de teste Fisher-Snedecor
\emptyset	Número de graus de liberdade em F_0
Γ	Função Gama
\mathbf{x}	Vetor de constante unitária e termos variáveis
m	Indicador do espaço do modelo
\mathbf{M}	Matriz de momentos
\mathbf{x}_s	Vetor de coordenadas do ponto estacionário
\mathbf{B}	Matriz de coeficientes dos termos de segunda ordem
\mathbf{b}	Vetor de coeficientes dos termos de primeira ordem
y_s	Estimativa da variável de resposta no ponto estacionário
λ	Autovalores da matriz $\hat{\mathbf{B}}$
w	Variáveis canônicas
\mathbf{I}	Matriz identidade
ρ	Raio da região experimental ou correlação de Pearson

\mathbf{X}	Vetor de fatores da matriz experimental
$f(\mathbf{X})$	Função objetivo
$g_j(\mathbf{X})$	Restrição genérica de desigualdade
$l_j(\mathbf{X})$	Restrição genérica de igualdade
α_1 e α_2	Pesos relativos de funções linearmente combinadas
n	Número de tentativas ou número total de dados
p	Probabilidade de ocorrência de um evento
Y	Variável aleatória
O	Valores observados
E	Valores esperados
r	Número de dados das linhas
c	Número de dados das colunas
χ_0^2	Estatística de teste Qui-quadrado
ν	Número de graus de liberdade em χ_0^2

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Tema e Justificativa	1
1.2	Objetivos.....	7
1.3	Limitações e delimitações do estudo	7
1.4	Estrutura do trabalho.....	8
2	METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA	9
2.1	Abordagem clássica e direcionamentos práticos	9
2.2	Arranjos CCD, pontos centrais e regiões de curvatura.....	12
2.3	Convexidade, sentido de otimização e restrições	21
2.4	Múltiplas respostas	27
2.4.1	Características críticas dos processos	27
2.4.2	A presença de correlação entre modelos.....	29
3	QUESTÕES E HIPÓTESES DO PROBLEMA	30
4	MÉTODO DE PESQUISA.....	32
4.1	Natureza teórica e classificação do estudo	32
4.2	Critérios de busca e seleção dos trabalhos.....	32
4.3	Catálogo dos trabalhos e testes de hipóteses	35
4.3.1	Organização e catalogação dos trabalhos	35
4.3.2	Testes de Hipóteses.....	36
4.3.2.1	Testes para proporções.....	37
4.3.2.2	Testes Qui-Quadrado	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
5.1	Principais observações e descrição dos trabalhos.....	41
5.2	Levantamento dos dados e avaliação de aspectos críticos.....	43
5.2.1	Variáveis de entrada ou parâmetros de controle	43
5.2.2	Número de experimentos e o uso de pontos fatoriais, axiais e centrais.....	45
5.2.3	Variáveis de resposta e a presença de correlação	48
5.2.3.1	Variáveis de resposta	48
5.2.3.2	Modelos correlacionados	51
5.2.4	Curvatura, convexidade e sentido de otimização.....	54
5.2.4.1	Regiões de Curvatura.....	54

5.2.4.2 Análise de Convexidade	57
5.2.4.3 Sentido de Otimização	63
5.3 Caso revisitado em manufatura avançada.....	67
5.3.1 Usinagem ultrassônica de materiais cerâmicos	67
6 CONCLUSÕES.....	82
6.1 Contribuições do trabalho.....	85
6.2 Sugestões para estudos futuros	85
REFERÊNCIAS	86

1 INTRODUÇÃO

1.1 Tema e Justificativa

Os processos industriais, em face dos diferentes fenômenos que os envolvem, restringem-se a condições de operação definidas por parâmetros de controle. Em processos de torneamento, por exemplo, o avanço (f), a velocidade de corte (V_c) e a profundidade (ap) constituem-se de variáveis operacionais sujeitas a especificações das máquinas (DINIZ *et al.*, 2014). Como resultado, o universo de possibilidades das variáveis de resposta também se torna restrito, formando uma região operacional delimitada (MYERS e MONTGOMERY, 2009). Para diferentes configurações técnicas, assim, existirão regiões operacionais específicas.

Notadamente, essa relação causal entre variáveis de entrada e de saída apresenta-se desde os primórdios da matemática, quando a imagem de uma função foi conceituada como resultado do processamento de um domínio (LEITHOLD, 1994). Nos casos reais, porém, as funções que modelam os processos de interesse são, normalmente, desconhecidas (BOX, 1954; STEWART, 2012). Com isso, torna-se difícil o reconhecimento total das regiões operacionais.

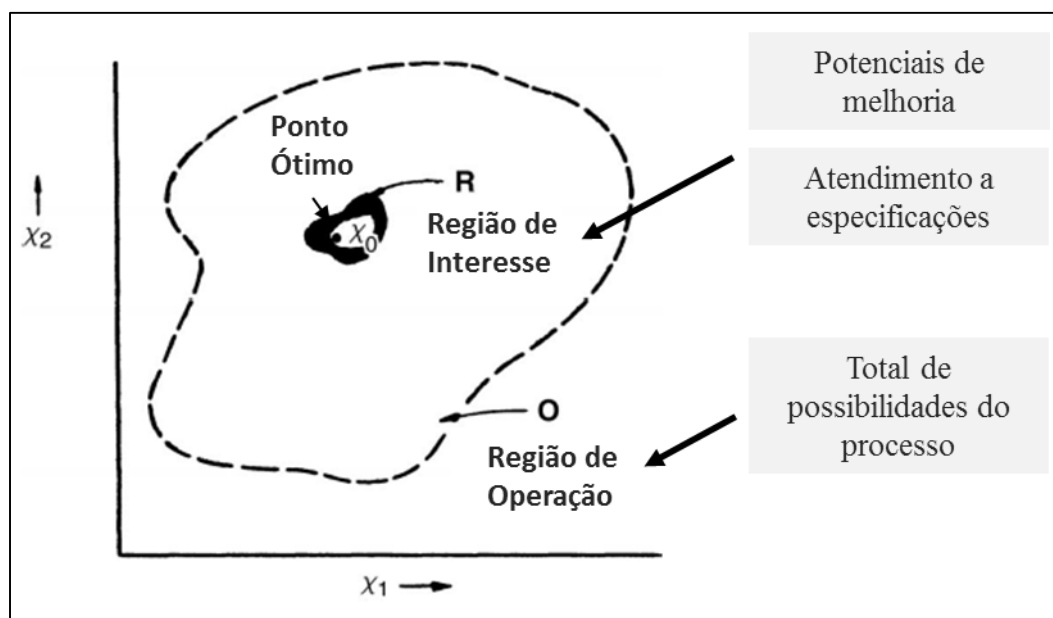


Figura 1.1 - Comparação entre os conceitos de região operacional e região de interesse

Fonte: Adaptado de Box e Draper (2007)

Por outro lado, nenhum impedimento técnico advém dessa limitação, haja vista que analistas e engenheiros, na maioria dos casos, não buscam um mapeamento global dos

processos nesse sentido matemático, mas regiões específicas que revelem potenciais de melhorias ou atendimento a especificações de projeto, conforme ilustrado pela Figura 1.1.

Apesar disso, outros problemas emergem, uma vez que a investigação dessas regiões implica, em primeiro lugar, no conhecimento do conjunto de variáveis que regem os processos estudados. Em paralelo, também pressupõe a utilização de procedimentos orientados para a avaliação de seus efeitos sobre as respostas mensuradas (MONTGOMERY, 2009).

Historicamente, muitas técnicas foram desenvolvidas para tratar questões iniciais como essas, culminando em um enorme conjunto de arranjos experimentais que compõem, atualmente, o estudo do Planejamento e Análise de Experimentos (DoE). Dentre os mais frequentemente apresentados na literatura, podem ser citados arranjos do tipo composto central (CCD), Box-Behnken e Taguchi.

A depender da aplicação, esses arranjos têm sido empregados individualmente (EKICI e MOTORCU, 2014; TEIMOURI *et al.*, 2017), de forma combinada (PATEL *et al.*, 2016) ou, ainda, comparativamente, na tentativa de apresentar os melhores resultados (SIVARAOS *et al.*, 2014). Aliado a isso, suas concepções também vêm sendo utilizadas em diferentes áreas do conhecimento, como Engenharia Química (GHAEDI *et al.*, 2015), Ciências Médicas (AUGUSTIN *et al.*, 2012) e Manufatura (ROSHAN *et al.*, 2013).

Muito embora esses processos sejam comumente analisados por métodos clássicos como a Análise de Variância (ANOVA), seus resultados atendem apenas parte dos anseios industriais e científicos. Em vista de processos novos, por exemplo, deseja-se primordialmente conhecer as variáveis de controle, suas possíveis interações, bem como seus efeitos sobre as características dos produtos finais – geralmente tratadas como variáveis de resposta.

Entretanto, para processos tradicionais, cuja espiral do conhecimento alonga-se por uma extensa janela temporal, possivelmente essas relações já estarão consolidadas. Nesses casos, para a obtenção de resultados de maior impacto, serão necessárias investigações mais profundas. Isto é, torna-se importante avaliar de que forma os valores atribuídos às variáveis de entrada influenciam nos itens processados, conforme exemplificado por diferentes trabalhos (HADAD, 2015; PRABHU e ALWARSAMY, 2017).

Além disso, em uma perspectiva mais ampla, torna-se indispensável o entendimento do que pode ser feito, em termos de engenharia, para escalar níveis mais elevados de precisão e controle industrial, criando sistemas produtivos cada vez mais eficientes. Em termos específicos, é exatamente por essa razão que a estatística tem sido incorporada na solução de

problemas do gênero, especialmente por sua forma de tratar a variabilidade e viabilizar a obtenção de modelos empíricos (MONTGOMERY e RUNGER, 2016).

Nesse sentido, as técnicas de modelagem também assumem um papel essencial, uma vez que permitem o estabelecimento de relações entre as variáveis de saída e as variáveis de entrada desses processos, resultando nos modelos pretendidos (BOX e DRAPER, 2007). Dessarte, é possível abstrair uma representação matemática dos casos reais que viabilize a solução do problema de forma racional, fomentando resultados concisos e argumentos robustos para a tomada de decisão.

Complementarmente, os métodos de otimização despontam como uma alternativa segura para a obtenção dos melhores cenários, sendo utilizados em conjunto com as técnicas de modelagem para explorar as regiões de interesse (Figura 1.1). Assim, por meio delas, pode-se identificar pontos que promovam a melhoria dos sistemas industriais, segundo determinado objetivo, como a redução de custos operacionais, o aumento da qualidade dos produtos ou a minimização do tempo de processo (COSTA *et al.*, 2016a; PAIVA *et al.*, 2007).

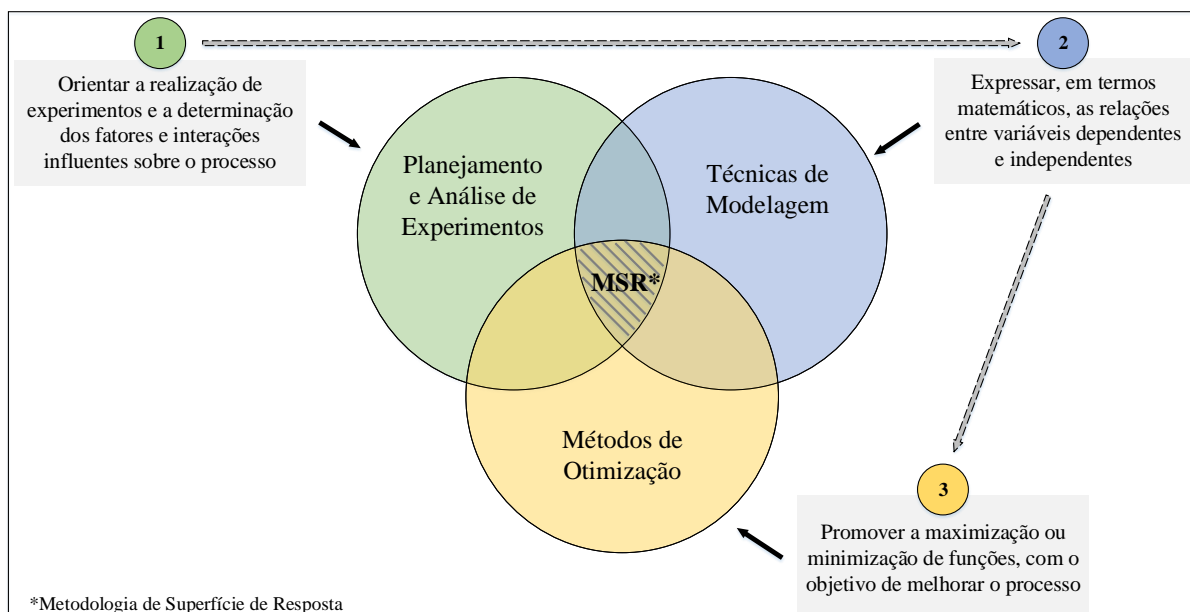


Figura 1.2 - Componentes técnicos da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), sequência geral de execução e descrição resumida de seus objetivos

Fonte: Autoria própria (2018)¹

¹ Muitos trabalhos corroboram com essa ilustração, tais como os estudos de Khuri e Cornell (1996) e Myers e Montgomery (2009).

Embora outros métodos revelem características semelhantes e possam ser usados com essa finalidade, a interseção entre o planejamento e análise de experimentos, as técnicas de modelagem e os métodos de otimização é o que caracteriza a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). A Figura 1.2 fornece uma ilustração de seus componentes, bem como uma descrição resumida de seus objetivos. Além disso, utilizando-se de setas unidirecionais, também expõe uma sequência geral de execução, na tentativa de concatenar as ideias até aqui contruídas.

Conquanto alguns trabalhos abordem a aplicação de superfícies de resposta como resultados gráficos de um estudo experimental, a metodologia em si, como idealizada, revela um horizonte muito mais amplo. Antes que a produção se inicie, por exemplo, os resultados de um processo podem ser equacionados com base em uma pequena quantidade de parâmetros de controle. Ademais, a obtenção de respostas ótimas pode ser garantida sempre que determinadas configurações forem atribuídas às variáveis de entrada (KHURI e CORNELL, 1996).

Esse escopo revela um elevado nível de sofisticação estatística e, por isso, exige procedimentos extremamente rigorosos. Ou seja, a fim de se viabilizar conclusões válidas, uma enorme quantidade de pressupostos deve ser atendida, tendo em vista que a compatibilidade das soluções com a realidade prática dos processos dependerá dos critérios adotados em cada etapa do método. Esse fato envolve tanto a coleta dos dados e a elaboração dos modelos como a otimização das respostas e a interpretação dos resultados.

Apesar disso, suspeita-se que a Metodologia de Superfície de Resposta venha sendo aplicada fora de seu escopo original, assim como ocorreu com os métodos de Taguchi entre as décadas de 80 e 90 (BARKER, 1990; MYSZKA, 2001). Naquela época, muitos autores se basearam em cursos de curta duração, que focavam isoladamente nos métodos, sem uma compreensão mais abrangente da filosofia da qualidade apresentada por Taguchi (FIOD NETO, 1997).

No caso da MSR, porém, embora haja certo consenso acerca de seus objetivos principais, muitos critérios intermediários, que podem ser ilustrados como interseções parciais do método, parecem ser negligenciados ou incompreendidos. A Figura 1.3 apresenta essas interseções e fomenta a discussão proposta no presente trabalho, em cuja vanguarda repousa uma investigação dessa conjuntura em trabalhos da área de manufatura.

Dado seu caráter exploratório, não figura entre os objetivos deste estudo o esgotamento do tema. Por esse motivo, foram analisados apenas alguns desses critérios intermediários (ou

aspectos críticos)². Em termos quantitativos, tomaram-se três itens da interseção entre o planejamento e análise de experimentos e as técnicas de modelagem, três dentre as técnicas de modelagem e os métodos de otimização e dois dentre os métodos de otimização e o planejamento e análise de experimentos (Figura 1.3).

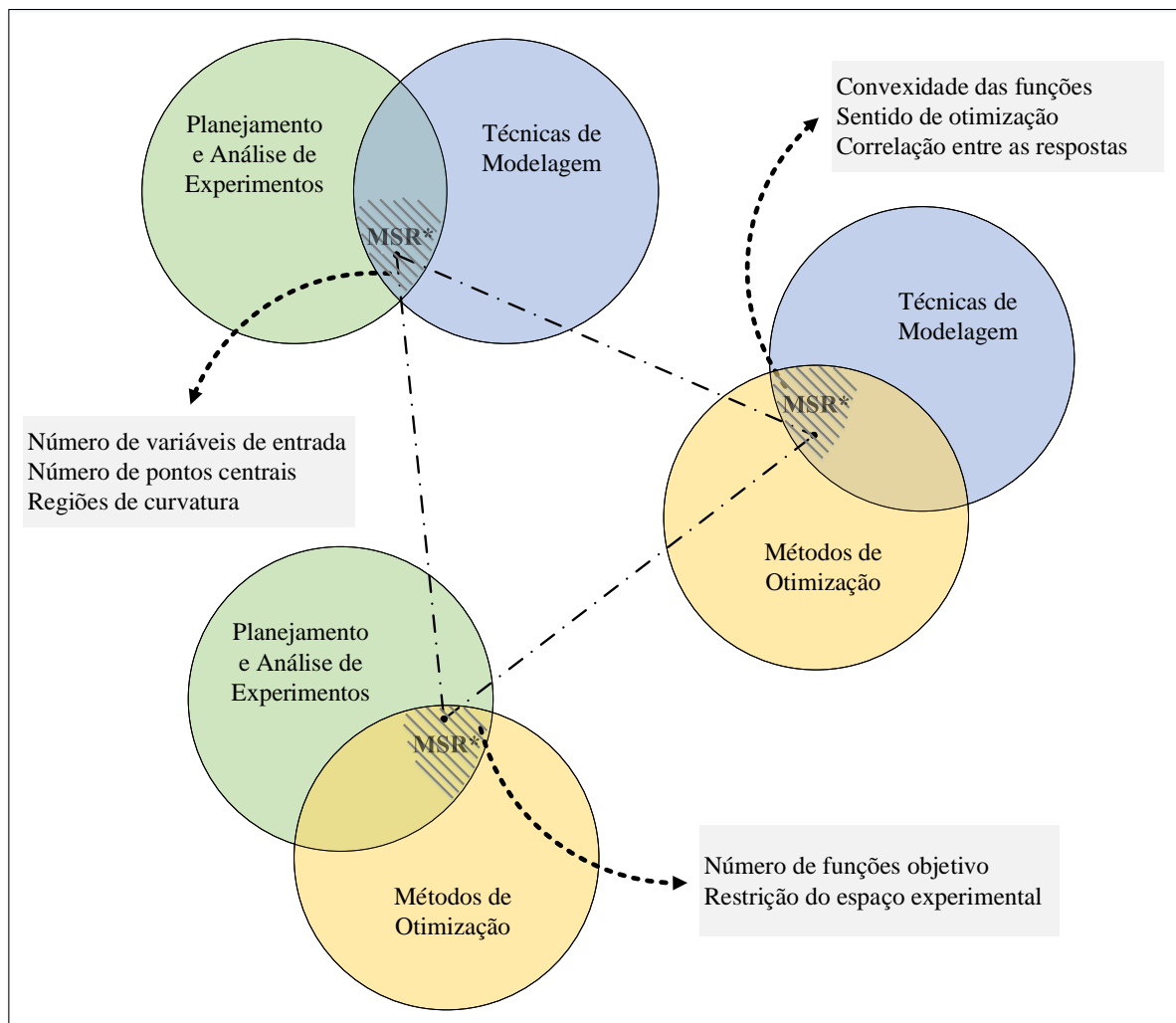


Figura 1.3 - Visão detalhada das interseções entre os componentes técnicos e os aspectos críticos da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR)

Fonte: Autoria própria (2018)

A justificativa para a adoção desses oito fatores inclui um enorme conjunto de argumentos, que são discutidos, em detalhes, na seção 2 – Metodologia de Superfície de

² Neste trabalho, consideram-se como critérios intermediários ou aspectos críticos as características intervenientes na qualidade de análises de Metodologia de Superfície de Resposta. Uma vez que não há, na literatura, uma terminologia sumária que agrupe os aspectos tratados na presente pesquisa (notem-se os oito itens destacados na Figura 1.3), esta será a forma de referência a esses pontos ao longo de todo o estudo.

Resposta. Embora não possa ser demonstrada uma hierarquia entre eles, por ausência de trabalhos que abordem a MSR sob esse viés, pode-se claramente provar a relevância desses itens na condução de análises consistentes.

Colocado de outra forma, é possível afirmar quão importantes são as características investigadas; no entanto, com base na literatura, não há elementos suficientes para sugerir um juízo de valor entre elas. Apesar disso, esse fato corrobora ainda mais com o presente estudo, uma vez que este pretende tratar de um tema muito pouco comentado, envolvendo a prática científica da MSR na área de manufatura e os impactos sobre suas conclusões.

Em meio a esse debate, o número de variáveis de entrada insurge-se como um dos itens associados ao planejamento e análise de experimentos, bem como às técnicas de modelagem. Isso ocorre, sumariamente, em virtude de afirmações de autores clássicos do método, como Myers e Montgomery (2009), por exemplo, que sugerem que a maior parte dos processos industriais contém, no máximo, cinco parâmetros de controle.

No mesmo grupo, o número de pontos centrais revela uma enorme envergadura no contexto da MSR, influenciando tanto sobre a estabilidade dos modelos e sua variância de previsão, quanto sobre a capacidade de se identificar as regiões de curvatura (BOX e DRAPER, 2007; KHURI e CORNELL, 1996). Essas últimas, por sua vez, definem quase que integralmente o significado prático da metodologia, ao representar, matematicamente, aquelas regiões específicas onde se acham ocultos os grandes potenciais de melhoria dos processos.

No âmbito das técnicas de modelagem e dos métodos de otimização, embora os itens revelem um caráter menos intrínseco, seus atributos definem, especifica e rigorosamente, as alternativas possíveis para a MSR. A convexidade das funções e o sentido de otimização, por exemplo, permitem distinguir entre a utilidade e a dispensabilidade dos pontos estacionários (DEL CASTILHO, 2007).

Esse fato rompe com a ideia de que, ao se submeter uma função qualquer a um algoritmo de otimização, o ponto estacionário será, por óbvio, o ponto de ótimo. Da mesma forma, a presença de correlação entre as variáveis de resposta rescinde o modo convencional de se abordar os problemas multiobjetivos³. Nesses casos, porém, isso ocorre em virtude das

³ Os problemas multiobjetivos são caracterizados pela presença de mais de uma característica de interesse (ou, variável de resposta), para as quais se atribui, individualmente, um determinado objetivo de otimização. Problemas de torneamento, nos quais se pretende a maximização da taxa de remoção de material e, concomitantemente, a minimização de custos (PAIVA *et al.*, 2007) são exemplos de problemas multiobjetivos.

deformações causadas pela correlação sobre os modelos estimados, como instabilidade, sobreajuste e/ou imprecisão (BRATCHELL, 1989; PAIVA *et al.*, 2009).

Situação semelhante é observada com o número de variáveis de resposta, uma vez que a própria quantidade de critérios define parte da estrutura de análise, interferindo no planejamento e análise de experimentos e, em especial, na aplicação dos métodos de otimização (Figura 1.3). Nessa mesma interface, a restrição do espaço experimental, ao se basear nas variáveis de entrada dos arranjos, apresenta-se como uma solução necessária a esses métodos em resposta a incompatibilidade entre convexidade e sentido de otimização (HOERL, 1985).

Dado o exposto, é de singular relevância o estudo dos atributos indicados na Figura 1.3, haja vista que analistas e engenheiros possam ser conduzidos a conclusões equivocadas, pela simples inobservância de interferências desses aspectos sobre a Metodologia de Superfície de Resposta. Além disso, uma importante lacuna é preenchida com esse processo, ao fornecer um conteúdo teórico integrado, envolvendo diretrizes práticas e aspectos intervenientes no método (seção 2), em conjunto com um panorama de aplicações recentes (seção 5).

1.2 Objetivos

Este estudo visa elaborar um diagnóstico, à luz da teoria, de aplicações da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) na área de manufatura. Para isso, conta com os seguintes objetivos específicos:

- a) Estruturar um conteúdo integrado da MSR, envolvendo seus fundamentos técnicos e diretrizes práticas;
- b) Levantar alguns aspectos críticos da MSR e avaliá-los no âmbito dos estudos experimentais;
- c) Identificar peculiaridades das aplicações e suas consequências sobre os resultados obtidos; e
- d) Suscitar novas oportunidades de pesquisa para a MSR em manufatura.

1.3 Limitações e delimitações do estudo

Embora se busque o preenchimento de uma importante lacuna com o presente trabalho, suas contribuições estão delimitadas a certo número de pressupostos e considerações.

Primeiramente, em face de seu escopo de análise, este estudo trata apenas de aplicações da Metodologia de Superfície de Resposta na área de manufatura.

Por esse motivo, a fim de se delimitar esse campo de estudo, o *International Journal of Manufacturing Technology* foi adotado como única fonte de dados. A justificativa para a adoção deste periódico será detalhadamente apresentada na seção 4 – Método de Pesquisa.

Nesse processo, os termos *Response Surface Methodology* e *Central Composite Design* foram utilizados como filtros de busca no interior do *IJAMT*. Assim, as análises reduziram-se a aplicações da MSR baseadas no arranjo composto central. Além disso, dada a necessidade de critérios para o início da pesquisa, adotaram-se artigos constantes na base da editora até 01/01/2017. Ainda assim, foram apreciados exclusivamente os trabalhos mais recentes, publicados ao longo dos últimos quatro anos.

Em relação aos critérios investigados, o presente trabalho aborda somente oito fatores dentre as interseções apresentadas na seção 1.1. Contudo, como foi justificado, este estudo inicia um novo ramo de debate científico, colocando-se na vanguarda de propostas do gênero.

1.4 Estrutura do trabalho

A fim de se conduzir a análise sob um encadeamento lógico, este trabalho foi organizado em seis seções principais. A primeira seção introduz o tema de pesquisa, contextualizando-o em bases teóricas e ilustrações práticas. Com isso, também apresenta a justificativa para a execução da proposta e inaugura o ponto de partida do trabalho, destacando sua necessidade ante a literatura (seção 1.1).

Na sequência, os objetivos do estudo são diretamente explicitados (seção 1.2), a fim de demonstrar o alvo ou ponto de chegada da pesquisa. Não obstante, as limitações do estudo são igualmente colocadas, indicando seus pressupostos e simplificações à luz da operacionalização das análises e do impacto sobre suas conclusões (seção 1.3)

O referencial teórico, por sua vez, é exposto na segunda seção e indica os fundamentos que sustentam as investigações realizadas. Com vistas ao seu completo entendimento, a seção 2 não se restringe apenas às abordagens clássicas da Metodologia de Superfície de Resposta. Agregadamente, também constrói uma estrutura prática para sua condução (seção 2.1) e reúne um conteúdo detalhado sobre oito de seus aspectos críticos (seções 2.2, 2.3 e 2.4).

A seção 3 dispõe todas as questões de pesquisa levantadas a partir dos fundamentos da seção 2 e enuncia as hipóteses associadas. A seção 4, nesse contexto, apresenta como o presente trabalho transita entre seus pontos de partida e de chegada (seções 1.1 e 1.2, respectivamente),

detalhando os procedimentos utilizados para a consecução de todos os seus objetivos. Em especial, são expostos os critérios adotados e a natureza científica das análises.

Com um direcionamento ainda mais específico, a seção 5 destaca os resultados do trabalho, em uma correspondência aos objetivos apresentados na seção 1.2. Desse modo, indica, inicialmente, as principais observações realizadas e elabora uma caracterização geral das informações obtidas (seção 5.1). Em seguida, realiza um levantamento de dados e fornece uma avaliação dos aspectos críticos (seção 5.2), possibilitando a revisitação de um caso típico em manufatura avançada (seção 5.3).

A seção 6, por fim, aponta as conclusões do trabalho, resumindo o que foi tratado ao longo das seções anteriores e abordando o conteúdo sob um ponto de vista mais amplo. Com isso, são elencadas as principais contribuições da pesquisa (seção 6.1) e apresentados seus direcionamentos futuros (seção 6.2).

2 METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Embora sua origem seja atribuída principalmente aos trabalhos de George Box e associados na década de 50, muitas outras contribuições foram incorporadas nas últimas décadas (BOX e WILSON, 1951; KHURI e CORNELL, 1996). Por esse motivo, diversos aspectos emergem como características influentes sobre a qualidade das análises oriundas da MSR, perpassando o planejamento de experimentos, a modelagem e a otimização.

2.1 Abordagem clássica e direcionamentos práticos

A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), em função de suas múltiplas perspectivas, revela um grande número de definições formais. Em uma de suas conceituações mais clássicas, esta se apresenta como um conjunto de ferramentas capazes de melhorar a investigação de uma determinada região experimental (MYERS *et al.* 1989). Trabalhos mais recentes, porém, a descrevem como um método útil no estabelecimento de relações matemáticas entre as variáveis de entrada e saída de um processo, de tal forma que seja possível sua otimização (BEZERRA *et al.*, 2008; KHURI e MUKHOPADHYAY, 2010).

Uma definição mais abrangente pode ser extraída de Myers e Montgomery (2009, p. 1, tradução nossa), onde a MSR é conceituada como “[...] uma coletânea de técnicas estatísticas e

matemáticas usadas para desenvolver, melhorar e otimizar processos”⁴. Embora a enunciem de forma ampla, esses autores estabelecem critérios bem definidos para condução dessa metodologia, detalhando os diferentes aspectos que a compõem. Em complemento, estudos de natureza mais aplicada fornecem guias práticos para análises do gênero (VADDE *et al.*, 2006). Com base na literatura clássica, a Figura 2.1 apresenta uma visão da MSR em etapas descritas e ilustradas.

Inicialmente, como um primeiro passo do método, devem ser determinadas as variáveis que regem os processos estudados (LUNDSTEDT *et al.*, 1998). Para isso, duas alternativas se destacam na literatura. Em um caminho mais tradicional, muitos autores se utilizam de arranjos fracionados (ou outros arranjos de poucas corridas), dada a exigência de um menor número de experimentos para a investigação de muitos fatores (BOX e HUNTER, 1961)⁵. Como uma segunda opção, preferível em alguns casos, sugere-se a adoção de fatores conhecidos a partir da experiência prática (GOOS e JONES, 2011), que também pode ser sucedida por um arranjo exploratório.

Em consequência do primeiro passo, o segundo revela a necessidade de se determinar a consistência dos fatores em termos de suas influências sobre o processo (Passo 2). Com esse objetivo, a Análise de Variância (ANOVA) apresenta-se como um recurso estatístico satisfatório e largamente empregado no contexto da MSR. Basicamente, seus resultados permitem distinguir, dentre as variáveis avaliadas, aquelas efetivamente significativas (CHENG e WU, 2001).

Uma vez definidos os parâmetros de controle e atestadas suas significâncias estatísticas, a escolha do arranjo experimental define a forma de coleta dos dados (BOX *et al.*, 2005), estabelecendo, em termos práticos, o “planejamento de experimentos” (Passo 3). Nessa etapa, os arranjos composto central (CCD) e Box-Behnken (BBD) apresentam-se como os mais usuais (MYERS e MONTGOMERY, 2009). A partir deles, a mensuração das respostas de interesse, apontada no Passo 4, pode ser efetivamente conduzida.

Na sequência do método, a avaliação da curvatura (Passo 5) emerge como um ponto de decisão entre o prosseguimento da análise, ao curso do Passo 6A, e o deslocamento do arranjo – indicado pela redefinição nos níveis dos fatores no Passo 6B. Inexistindo curvatura, o arranjo

⁴ “[...] a collection of statistical and mathematical techniques useful for developing, improving, and optimizing processes.

⁵ Box e Hunter (1961), Bezerra *et al.* (2008), Del Castilho (2007) e outros empregam o termo *screening variables* ou *fator screening* para se referirem a etapa de investigação dos principais parâmetros do processo.

é movido em outra direção (BRIGHTMAN, 1978). Do contrário, são adicionados os pontos axiais (Passo 6A) e realizados novos ensaios, conforme descrito no Passo 7.

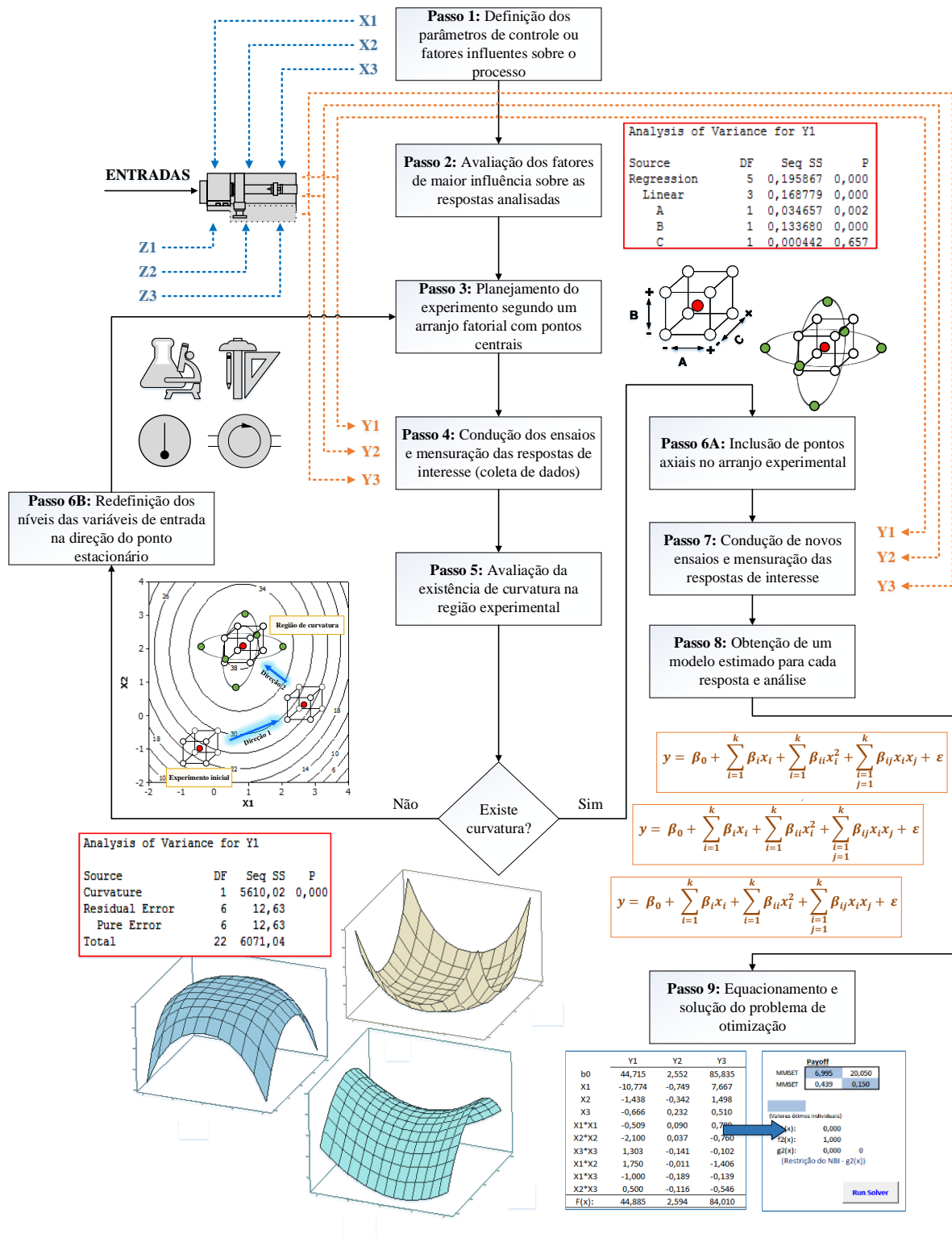


Figura 2.1 - Roteiro para condução da Metodologia de Superfície de Resposta

Fonte: Autoria própria (2018)

Nessa região, as respostas são utilizadas para a elaboração de modelos matemáticos capazes de representar adequadamente o fenômeno em termos de seus parâmetros de controle (Passo 8). Tipicamente, emprega-se um modelo de segunda ordem expandido em série de Taylor, segundo expresso pela Equação 2.1 (BEZERRA *et al.*, 2008).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ j=1}}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.1)$$

onde:

y representa a função real a ser modelada;

β_0 representa o termo constante do modelo;

β_i representa os coeficientes dos termos lineares;

β_{ii} representa os coeficientes dos termos quadráticos;

β_{ij} representa os coeficientes dos termos de interação entre os fatores; e

ε representa o resíduo associado ao modelo estimado.

De modo geral, a otimização constitui-se da etapa final da MSR onde cada modelo é tratado como uma função objetivo. Do equacionamento de funções e restrições, resolve-se o problema com base em um método de otimização específico (Passo 9). O resultado dessa análise fornecerá os valores dos parâmetros de controle que produzem os melhores cenários para as respostas (que, na prática, representam as características críticas para a qualidade dos processos).

2.2 Arranjos CCD, pontos centrais e regiões de curvatura

O arranjo composto central (CCD), desenvolvido por Box e Wilson em 1951, apresenta-se como o arranjo de segunda ordem mais empregado em estudos experimentais (MYERS e MONTGOMERY, 2009). Tipicamente, esse arranjo envolve a utilização de pontos fatoriais, centrais e axiais na tentativa de explorar uma dada região de interesse (BOX e DRAPER, 2007).

Os pontos fatoriais localizam-se nas extremidades do arranjo e são obtidos a partir da combinação dos níveis de cada um dos fatores – também chamados de variáveis de entrada. Quando utilizados isoladamente, esses pontos caracterizam os arranjos fatoriais, como pode ser verificado na Figura 2.2.

Assumindo-se dois níveis em cada fator (- e +), os exemplos da Figura 2.2 revelam arranjos para diferentes quantidades de variáveis de entrada. O caso apresentado na Figura 2.2b, por exemplo, pode representar um processo de produção de etanol, no qual a concentração final do combustível é controlada pela concentração de cloreto de amônio (Fator A), quantidade de levedura (Fator B) e temperatura (Fator C), como observado no trabalho de Yücel e Göycincik (2015).

Outro exemplo pode ser encontrado em Lin *et al.* (2012) e caracteriza o arranjo apresentado na Figura 2.2c. Nesse caso, três características críticas para a usinagem por descarga elétrica são modeladas pela corrente de pico (Fator A), pelos tempos de ativação e desativação do pulso (Fatores B e C) e pela velocidade de rotação do eletrodo (Fator D).

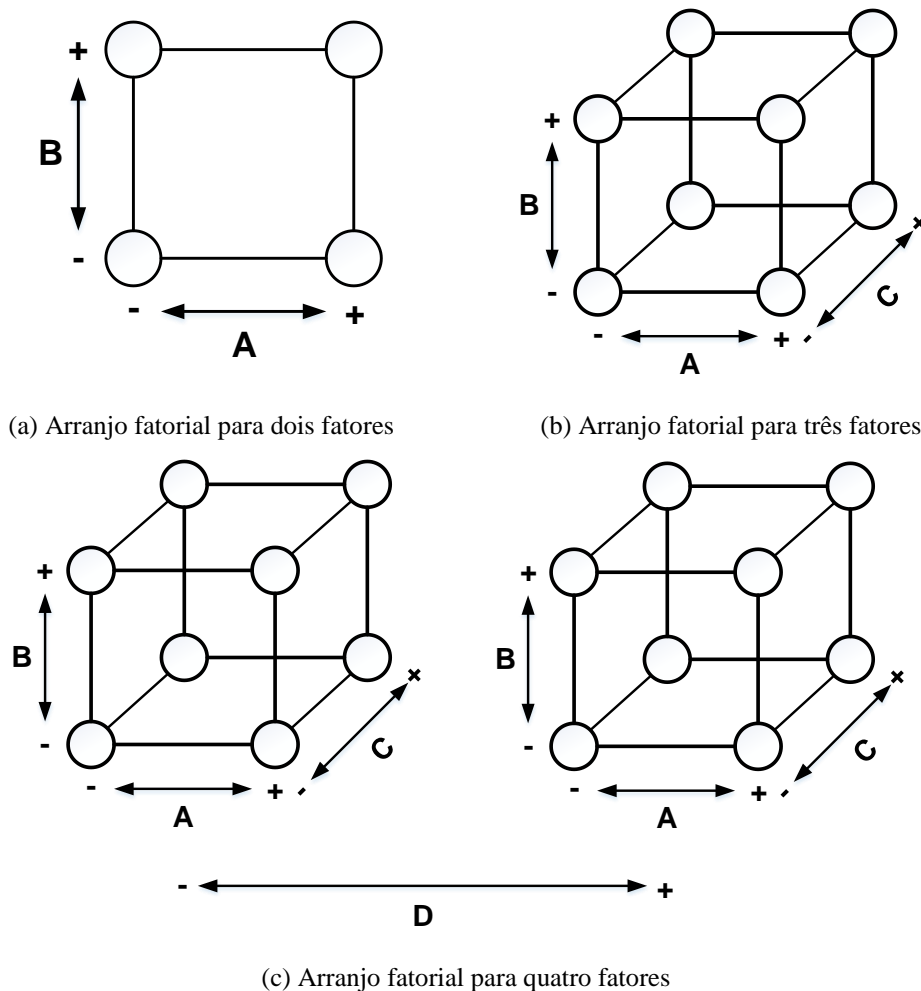


Figura 2.2 - Exemplos de arranjos fatoriais completos com dois níveis em cada fator ou variável de entrada

Fonte: Autoria própria (2018)

Considerando-se uma abordagem sequencial (KHURI e CORNELL, 1996), os pontos centrais formam a segunda tipologia de pontos a ser incluída no arranjo, uma vez que permitem a análise da curvatura na região investigada. Quando constatada, os pontos axiais são finalmente adicionados, determinando o número total de experimentos em um arranjo composto central, segundo expresso pela Equação 2.2.

$$N = 2^k + 2k + n_c \quad (2.2)$$

onde:

N é o número total de experimentos;

k é o número de fatores ou variáveis de entrada;

2^k é o número de pontos fatoriais;

$2k$ é o número de pontos axiais; e

n_c é o número de pontos centrais.

Os pontos centrais são posicionados exatamente no centro do arranjo e podem ser obtidos com níveis médios dos fatores (geralmente identificados por 0). Os pontos axiais, por sua vez, extrapolam os níveis inferior e superior de cada fator e localizam-se fora da região cuboidal de experimentação, possibilitando uma melhor estimativa dos termos quadráticos (MYERS e MONTGOMERY, 2009). A Figura 2.3 exibe uma visão esquemática do arranjo composto central, incluindo todas as suas tipologias de pontos.

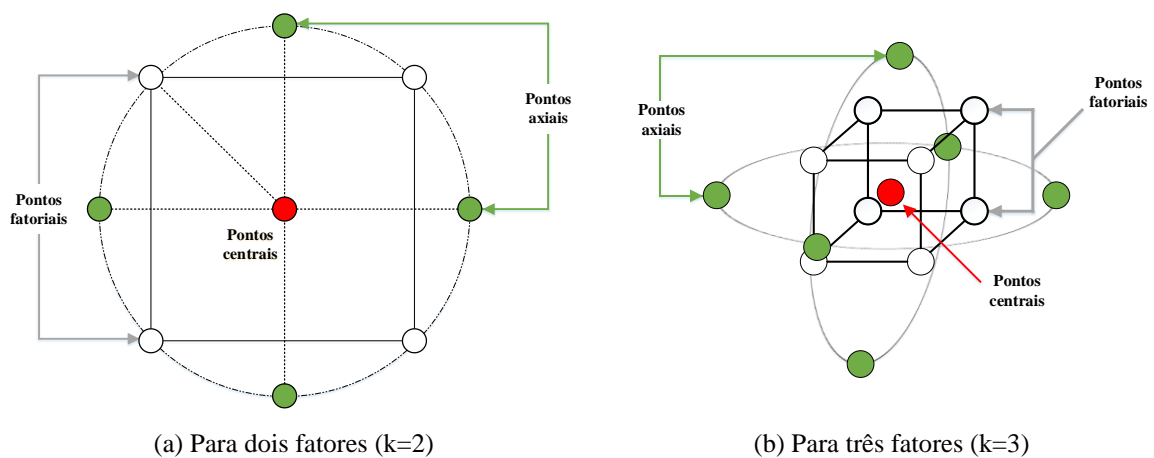


Figura 2.3 - Visão esquemática do arranjo composto central

Fonte: Autoria própria (2018)

A distância dos pontos axiais ao centro do arranjo é dada segundo a Equação 2.3.

$$\alpha = 2^{k/4} \quad (2.3)$$

onde:

α é a distância dos pontos axiais em relação ao centro do arranjo; e

k é o número de fatores ou variáveis de entrada.

Como foi sumariamente apresentado na seção 2.2, os arranjos experimentais promovem a coleta orientada de dados, de tal forma que seja possível a modelagem de uma determinada região de interesse. Essa região geralmente define um local de curvatura significativa. Por esse motivo, a literatura converge sobre a necessidade de identificá-la precisamente no interior da região de operação (BOX e DRAPER, 2007; KHURI e CORNELL, 1996; MYERS e MONTGOMERY, 2009).

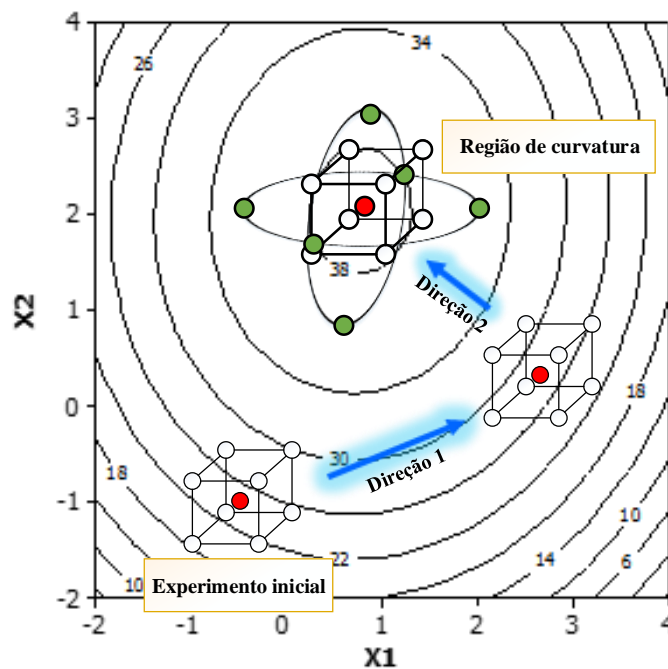


Figura 2.4 - Visão esquemática do processo de identificação da região de curvatura utilizando-se do Método do Vetor Gradiente

Fonte: Autoria própria (2018)

Um dos métodos de otimização comumente utilizados para esse fim é conhecido como Método do Vetor Gradiente (ou, em inglês, *steepest ascent method*). De origem na matemática pura, sua formulação tem sido aplicada ao contexto experimental desde os primórdios da MSR

(BRIGHTMAN, 1978; DUINEVELD *et al.*, 1994). Por meio dele, a função modelada a partir dos dados experimentais⁶ é submetida a um processo de diferenciação. Dessa forma, o vetor gradiente é obtido e a direção do ponto estacionário pode ser verificada. Com precisão satisfatória, esse procedimento garante a correta localização da região de curvatura.

Muito embora a seção 2.3 dedique-se a apresentar, em detalhes, os pontos estacionários e suas diferentes caracterizações, a Figura 2.4 fornece uma concepção inicial com base no método supradescrito. Assim, essa ilustração faz alusão a um ponto estacionário genérico, cuja obtenção se dá em virtude de múltiplas iterações (nesse caso, referentes às direções 1 e 2).

Um teste de curvatura típico consiste em comparar a média das respostas medidas nos pontos fatoriais com a média das respostas medidas nos pontos centrais (MYERS e MONTGOMERY, 2009), de tal forma que seja possível avaliar se o somatório dos coeficientes dos termos quadráticos iguala-se a ou é diferente de zero, conforme estabelecido pelo enunciado da Equação 2.4.

$$\begin{aligned} H_0: \sum_{j=1}^k \beta_{jj} &= 0 \\ H_1: \sum_{j=1}^k \beta_{jj} &\neq 0 \end{aligned} \tag{2.4}$$

onde:

β_{jj} corresponde aos coeficientes dos termos quadráticos; e

j representa a ordem dos termos com coeficientes β_{jj} .

O teste utiliza a soma de quadrados apresentada na Equação 2.5, com formulação composta pelas médias das respostas medidas e pelas quantidades de pontos fatoriais e centrais do arranjo experimental.

$$SQ_{quadrático\ puro} = \frac{n_F n_C (\bar{y}_F - \bar{y}_C)^2}{n_F + n_C} \tag{2.5}$$

⁶ Os modelos iniciais são obtidos a partir de um arranjo fatorial com pontos centrais. Os pontos axiais devem ser incluídos apenas na região de curvatura.

onde:

n_F representa o número de pontos fatoriais do arranjo experimental;

n_C representa o número de pontos centrais incluídos no arranjo;

\bar{y}_F representa a média das respostas medidas nos pontos fatoriais; e

\bar{y}_C representa a média das respostas medidas nos pontos centrais.

Tendo em vista que o cálculo de $SQ_{quadrático\ puro}$ apresenta grau de liberdade unitário, obtém-se uma relação de identidade entre a Equação 2.5 e a média de quadrados associada aos termos quadráticos do modelo, qual seja:

$$MQ_{quadrático\ puro} = \frac{n_F n_C (\bar{y}_F - \bar{y}_C)^2}{n_F + n_C} \quad (2.6)$$

A partir da análise de variância (ANOVA), pode-se obter a soma de quadrados do erro experimental pela seguinte formulação:

$$SQ_{erro} = \sum_{i=1}^{n_C} (y_i - \bar{y}_C)^2 \quad (2.7)$$

onde:

y_i representa as respostas medidas em cada um dos pontos centrais i .

Com $(n_C - 1)$ graus de liberdade, obtém-se uma estimativa conveniente para o erro quadrado médio que, com toda lógica, constitui-se de um estimador não tendencioso para a variabilidade natural do fenômeno estudado. Isso ocorre uma vez que esse estimador resulta do cálculo da variância entre respostas medidas sob as mesmas condições experimentais nos parâmetros de controle e pode ser expresso como⁷:

⁷ Essa é uma justificativa satisfatória para a não utilização de réplicas em arranjos de Metodologia de Superfície de Resposta, como o CCD, por exemplo, tendo em vista que o MQ_{erro} pode ser calculado apenas com os pontos centrais. Admitindo-se que o sistema de medição possui baixa linearidade, a incerteza de medição nos pontos centrais é a mesma que a dos pontos axiais e fatoriais.

$$MQ_{erro} = \frac{SQ_{erro}}{n_c - 1} = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} (y_i - \bar{y}_c)^2}{n_c - 1} \quad (2.8)$$

Da razão entre a variância estimada entre os pontos fatoriais e centrais (*between*) e a variância do erro experimental (*within*), pode-se calcular a estatística F pela expressão:

$$F_0 = \frac{MQ_{quadrático\ puro}}{MQ_{erro}} = \frac{\left[\frac{n_F n_C (\bar{y}_F - \bar{y}_C)^2}{n_F + n_C} \right]}{\left[\frac{\sum_{i=1}^{n_c} (y_i - \bar{y}_c)^2}{n_c - 1} \right]} \quad (2.9)$$

O *p-value* advém da integral imprópria da distribuição Fisher-Snedecor com graus de liberdade ϕ_1 e ϕ_2 (FORBES *et al.*, 2010), conforme demonstrado pela Equação 2.10.

$$P(X > F_0) = \int_{x=F_{calc}}^{+\infty} \frac{\Gamma[(\phi_1 + \phi_2)/2]}{\Gamma(\phi_1/2)\Gamma(\phi_2/2)} \left(\frac{\phi_1}{\phi_2}\right)^{\phi_2/2} \frac{x^{(\phi_2-2)/2}}{[1 + (\phi_1/\phi_2)x]^{(\phi_1+\phi_2)/2}} dx \quad (2.10)$$

onde:

ϕ_1 representa o número de graus de liberdade do numerador em F_0 ;

ϕ_2 representa o número de graus de liberdade do denominador em F_0 ; e

Γ representa a função Gama.

Substituindo-se ϕ_1 por 1 e ϕ_2 por $(n_c - 1)$ na Equação 2.10, chega-se em:

$$\begin{aligned} &P(X > F_0) \\ &= \int_{x=F_{calc}}^{+\infty} \frac{\Gamma[(1 + n_c - 1)/2]}{\Gamma(1/2)\Gamma((n_c - 1)/2)} \left(\frac{1}{n_c - 1}\right)^{(n_c-1)/2} \frac{x^{(n_c-1-2)/2}}{[1 + (1/n_c - 1)x]^{(1+n_c-1)/2}} dx \end{aligned} \quad (2.11)$$

donde se obtém uma expressão para o *p-value* em função do número de pontos centrais do arranjo e da variável contínua x , com domínio no intervalo $[0, +\infty)$:

$$P(X > F_0) = \int_{x=F_{calc}}^{+\infty} \frac{\Gamma[(n_c)/2]}{\Gamma(1/2)\Gamma((n_c - 1)/2)} \left(\frac{1}{n_c - 1}\right)^{(n_c-1)/2} \frac{x^{(n_c-3)/2}}{[1 + (1/n_c - 1)x]^{(n_c)/2}} dx \quad (2.12)$$

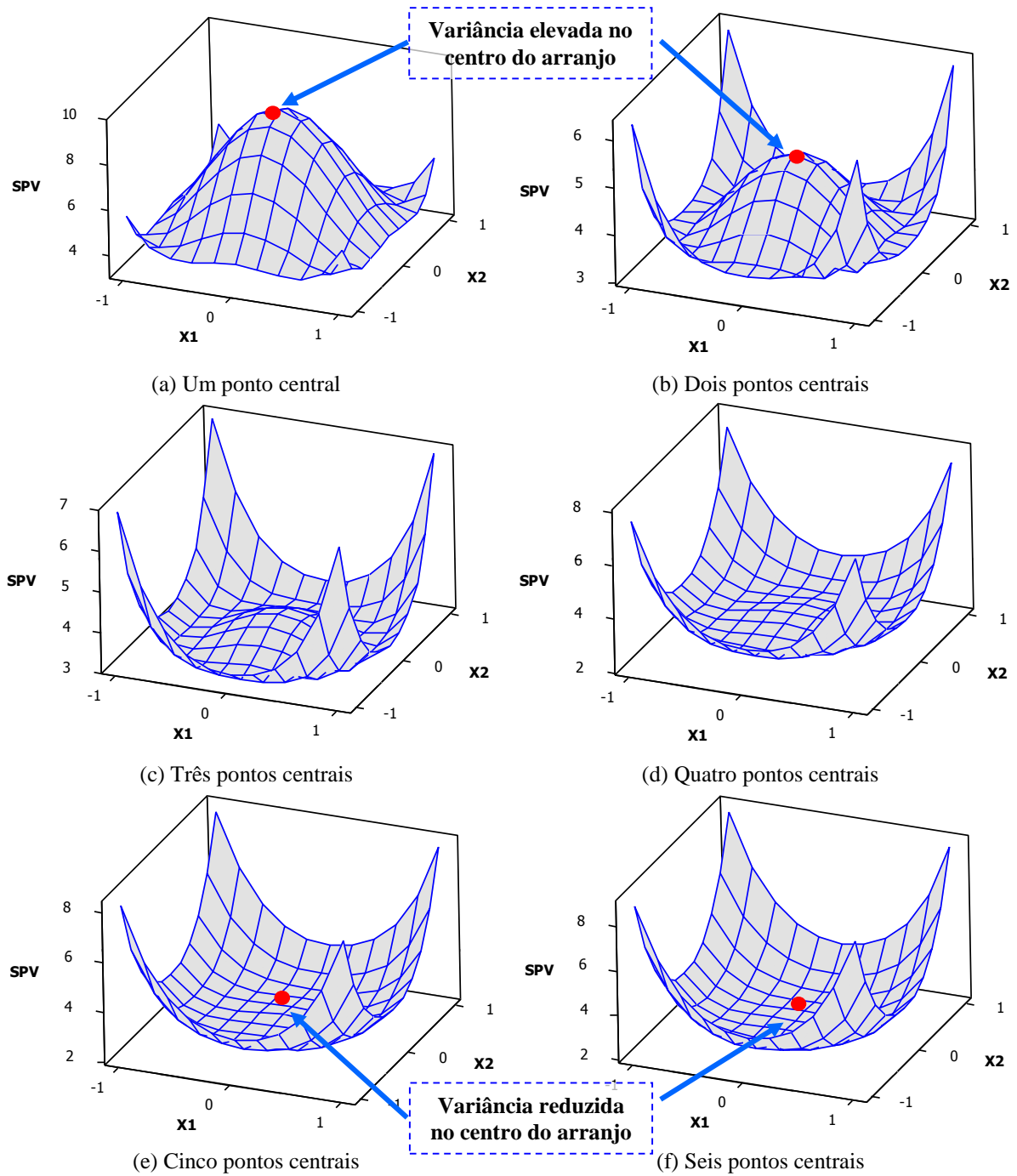


Figura 2.5 - Variância escalada de previsão para diferentes quantidades de pontos centrais

Fonte: Autoria própria (2018)

Embora todos os pontos sejam de extrema relevância para os arranjos CCD, os pontos centrais parecem se destacar no contexto da experimentação. Como verificado ao longo desta seção, esses pontos viabilizam a correta localização das regiões de curvatura. Adicionalmente, também garantem a estabilidade dos arranjos.

Em outras palavras, quanto maior a quantidade de pontos centrais utilizados, menor será a variância no centro do modelo. Assim, com base nesse conceito, a Figura 2.5 ilustra a variância escalada de previsão (*SPV – Scaled Prediction Variance*) para diferentes quantidades de pontos centrais, calculada a partir da Equação 2.13 e suas expressões derivadas (MYERS e MONTGOMERY, 2009).

A variância escalada de previsão é definida a partir do escalonamento da variância total do modelo estimado $\hat{y}(\mathbf{x})$ pela variância das repostas medidas y nos pontos \mathbf{x} estabelecidos pela matriz experimental:

$$SPV(\mathbf{x}) = N \frac{Var[\hat{y}(\mathbf{x})]}{\sigma^2} \quad (2.13)$$

Substituindo-se a razão de variâncias pela multiplicação de matrizes do arranjo, obtém-se a expressão:

$$SPV(\mathbf{x}) = N \mathbf{x}^{(m)'} (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} \mathbf{x}^{(m)} \quad (2.14)$$

Algebricamente, o termo correspondente ao número total de experimentos N pode ser reescrito como constante divisora da matriz $\mathbf{X}'\mathbf{X}$:

$$SPV(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^{(m)'} \left(\frac{\mathbf{X}'\mathbf{X}}{N} \right)^{-1} \mathbf{x}^{(m)} \quad (2.15)$$

donde se identifica a matriz de momentos $\mathbf{X}'\mathbf{X}/N$:

$$SPV(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^{(m)'} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{x}^{(m)} \quad (2.16)$$

onde:

\mathbf{x} representa um vetor de constante unitária e termos variáveis;

m indica que $\mathbf{x}^{(m)}$ é a expansão de \mathbf{x} para o espaço do modelo; e \mathbf{M} representa a matriz de momentos.

Quando apenas um ponto central é empregado (Figura 2.5a), a variância de previsão é máxima, sendo diminuída na medida em que mais pontos centrais são adicionados ao arranjo. Para um experimento com dois fatores, a literatura indica a utilização de cinco pontos centrais (Figura 2.5e), uma vez que quantidades maiores não reduzem expressivamente a variância. Visualmente, isso pode ser observado ao se comparar as Figuras 2.5e e 2.5f, nas quais as superfícies de resposta se mostram quase idênticas.

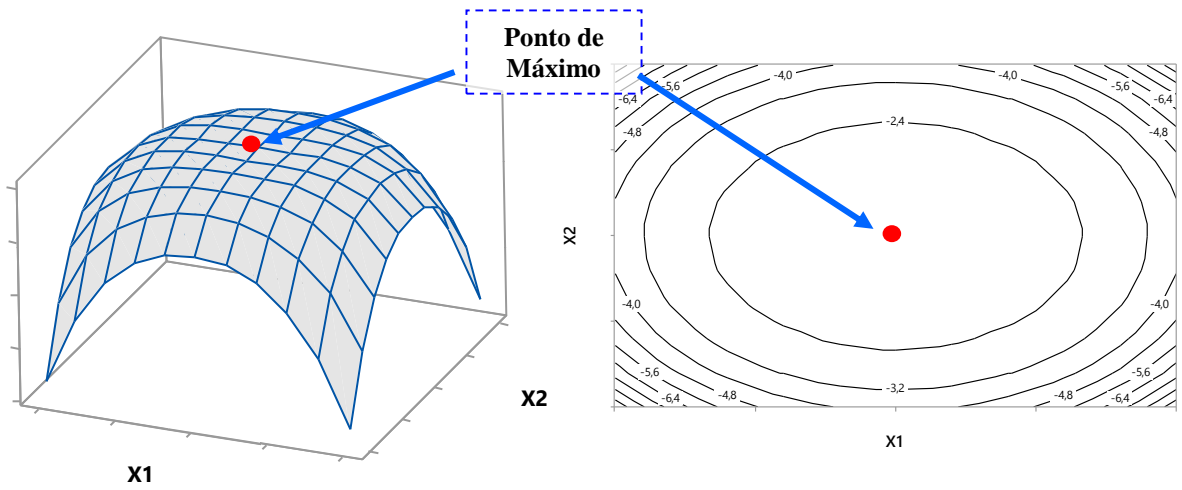
É necessário compreender claramente que o experimentador não conhece o lado de fora do espaço experimental que ele deseja prever, ou onde no espaço experimental o ótimo pode se encontrar. Assim, uma variância de previsão escalada $N \text{Var}[\hat{y}(\mathbf{x})]/\sigma^2$ razoavelmente estável garante que a qualidade de (\mathbf{x}) como uma previsão dos valores de respostas futuros é similar ao longo da região de interesse (MYERS e MONTGOMERY, 2009, p. 545-546, tradução nossa)⁸

2.3 Convexidade, sentido de otimização e restrições

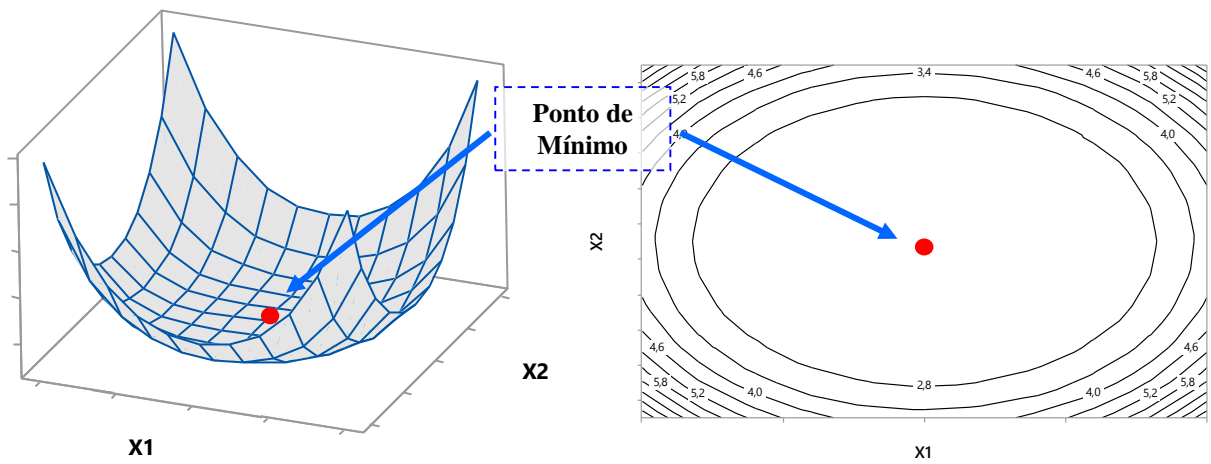
Diversos aspectos críticos emergem da interface entre as etapas de modelagem e otimização da Metodologia de Superfície de Resposta. Dentre eles, podem ser mencionados o formato da função obtida – também conhecida pelo termo “convexidade” (BOX e DRAPER, 2007) – e o sentido de otimização (ZAVADSKAS e TURSKIS, 2010). Enquanto o primeiro refere-se a uma característica intrínseca do modelo matemático, o segundo demonstra um atributo extrínseco, definido na fase de obtenção dos valores ótimos.

Acerca da convexidade das funções, a literatura fornece uma enorme gama de abordagens (DEL CASTILHO e CAHYA, 2001; PETERSON e KUHN, 2005, entre outros). Apesar da quantidade de trabalhos, porém, há consenso sobre a existência de apenas três tipos de formatos possíveis para superfícies oriundas de funções quadráticas, embora nem sempre estejam completamente explícitas em uma análise gráfica (BEZERRA *et al.*, 2008).

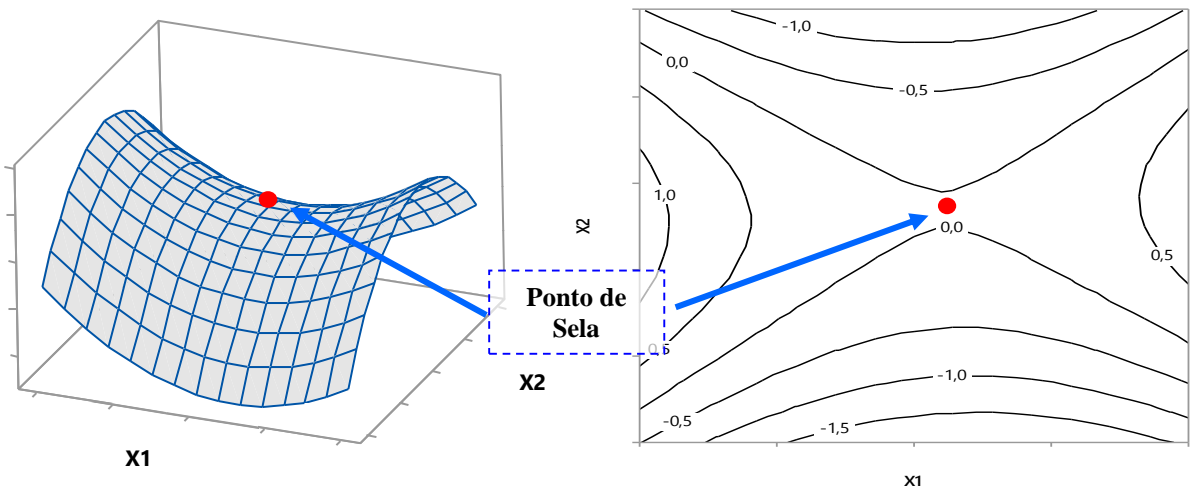
⁸ It must be clearly understood that the experimenter does not know at the outset where in the design space he or she may wish to predict, or where in the design space the optimum may lie. Thus, a reasonably stable scaled prediction variance $N \text{Var}[\hat{y}(\mathbf{x})]/\sigma^2$ provides insurance that the quality of the (\mathbf{x}) as a prediction of future response values is similar throughout the region of interest.



(a) Superfície côncava



(b) Superfície convexa



(c) Superfície em formato de sela

Figura 2.6 - Formato das superfícies, gráficos de contorno e pontos estacionários

Fonte: Autoria própria (2018)

As funções côncavas são caracterizadas por superfícies semelhantes a cúpulas. Funções convexas, porém, exibem contornos próximos de jarros achatados ou bacias (EDWARDS, 2007). As funções em formato de sela, por sua vez, carregam na própria nomenclatura a descrição de seu formato geométrico – isto é, “sela” –, sendo também conhecidas por outros nomes, como “vale” e “minimax” (BOX e DRAPER, 2007). A Figura 2.6 apresenta essas funções para casos com apenas duas variáveis de entrada e ilustra as superfícies em conjunto com os gráficos de contorno associados.

Uma vez que a visualização gráfica pode induzir a interpretações equivocadas (BEZERRA *et al.*, 2008), especialmente para um número superior de fatores, a literatura apresenta métodos analíticos para se caracterizar a natureza do ponto estacionário e, com isso, a convexidade das funções (LIN e PETERSON, 2006). O conjunto formado pelas Equações 2.17, 2.18 e 2.19 descreve essa abordagem matemática (MYERS e MONTGOMERY, 2009).

Inicialmente, a Equação 2.17 explicita as coordenadas do ponto estacionário como função dos coeficientes do modelo estimado para uma variável de resposta qualquer. A Equação 2.18, na sequência, traz luz sobre os autovalores da matriz de coeficientes dos termos de segunda ordem. A partir dela, observa-se que os valores assumidos pela variável de resposta nas proximidades dos pontos estacionários são definidos como incrementos da resposta obtida nesses mesmos pontos.

$$\mathbf{x}_s = -\frac{1}{2}\mathbf{B}^{-1}\mathbf{b} \quad (2.17)$$

onde:

\mathbf{x}_s é o vetor de coordenadas do ponto estacionário;

\mathbf{B}^{-1} é a inversa da matriz de coeficientes dos termos de segunda ordem; e

\mathbf{b} é o vetor de coeficientes dos termos de primeira ordem.

Sob argumentos matemáticos, se em qualquer direção das variáveis canônicas w_i , o incremento for negativo ($\lambda < 0$), significa que o ponto estacionário descreve a máxima resposta da função – ponto de máximo. De modo análogo, se em qualquer direção dessas variáveis, o incremento for positivo ($\lambda > 0$), significa que a resposta cresce ao se afastar do ponto estacionário, o que o torna um ponto de mínimo. Se, ainda, em cada direção w_i , for observado um incremento diferente (ora positivo, ora negativo), o ponto estacionário não representa nenhum extremo da função e tem-se um ponto de sela.

$$\hat{y} = \hat{y}_s + \sum_{i=1}^k \lambda_i w_i^2 \quad (2.18)$$

onde:

\hat{y}_s é a estimativa da variável de resposta no ponto estacionário;

λ_i são os autovalores de $\hat{\mathbf{B}}$, para $i = 1, 2, 3, \dots, k$; e

w_i são as variáveis canônicas.

A Equação 2.19 descreve os autovalores como importâncias que anulam o determinante da diferença entre a matriz de coeficientes \mathbf{B} e a matriz identidade \mathbf{I} . Em termos práticos, se todos os autovalores forem negativos, tem-se um ponto de máximo e, portanto, a função é côncava. Por outro lado, se todos os autovalores forem positivos, tem-se um ponto de mínimo, o que explicita uma função convexa. Se, porém, dentre os autovalores, existirem tanto sinais positivos quanto negativos, então a função revela uma superfície em formato de sela (NAVES *et al.*, 2017; SAMBUCINI, 2012).

$$|\mathbf{B} - \lambda \mathbf{I}| = 0 \quad (2.19)$$

onde:

\mathbf{B} é a matriz de coeficientes dos termos de segunda ordem;

\mathbf{I} é a matriz identidade; e

λ são os autovalores de $\hat{\mathbf{B}}$.

Como verificado ao longo desta seção, a convexidade das funções possui muitas características e implicações matemáticas (MYERS e MONTGOMERY, 2009). Notadamente, a correta compreensão da natureza dos pontos estacionários e do formato geométrico das superfícies fornece informações importantes sobre o comportamento das variáveis de resposta em termos de seus fatores e interações (KHURI e CORNELL, 1996).

Entretanto, considerando-se a otimização como um terceiro componente da MSR, conforme apresentado na seção 1.1, o sentido de otimização emerge como um aspecto de igual relevância. Este, porém, estabelece-se mais como um paradigma analítico, capaz de interligar a natureza lógica das etapas de modelagem e otimização com seu significado prático.

Embora frequentemente utilizado na literatura, parece não haver uma definição formal para esse conceito. No entanto, o mesmo pode ser entendido como um atributo necessário às funções objetivo, a ser deliberado segundo a natureza do problema (RAO, 2009; ZAVADSKAS

e TURSKIS, 2010). Sua caracterização, assim, fornece um direcionamento racional às diversas funções a serem otimizadas, indicando sua minimização ou maximização (DEB *et al.*, 2017; ŠAPARAUSKAS *et al.*, 2011).

À exemplo disso, é comum minimizar a rugosidade de peças usinadas (KANT e SANGWAN, 2014; ÖKTEM *et al.*, 2005), maximizar a resistência à tração de ligas soldadas (KUMAR *et al.*, 2017; SUDHAGAR *et al.*, 2017), minimizar o consumo de energia em processos de pelotização (SONG *et al.*, 2014) e maximizar a produção de biodiesel (ABUHABAYA *et al.*, 2013).

Apesar das muitas aplicações, normalmente a convexidade e o sentido de otimização são tratados isoladamente pela maioria dos autores. Alguns poucos trabalhos, contudo, fornecem abordagens conjuntas e demonstram a interdependência de ambos os conceitos (COSTA *et al.*, 2016a). Desses estudos, observa-se que, por natureza, uma função côncava é compatível com o sentido de maximização, uma vez que apresenta um ponto de máximo. Analogamente, nota-se que uma função convexa é própria da minimização, visto que possui um ponto de mínimo.

Apesar disso, existem casos nos quais o sentido de otimização é incompatível com convexidade da função a ser otimizada. Isto é, deseja-se minimizar uma função côncava, maximizar uma função convexa ou, ainda, minimizar ou maximizar uma função em formato de sela. Quando isso ocorre, o uso de uma restrição do espaço experimental apresenta-se como uma alternativa satisfatória para a solução do problema (DEL CASTILHO, 2007; HOERL, 1985). No entanto, parece haver poucos trabalhos que a utilizam (GOMES *et al.*, 2013; PAIVA *et al.*, 2009)

$$\mathbf{x}^T \mathbf{x} \leq \rho^2 \quad (2.20)$$

onde:

ρ é o raio do arranjo experimental.

A Figura 2.7 resume a relação entre os três aspectos críticos tratados na presente seção. Para isso, a ilustração lança mão de uma analogia entre os conceitos apresentados e a movimentação ao curso de uma montanha. Nesse caso, a formação rochosa representa o formato da função obtida na etapa de modelagem da MSR. Como mencionado, esta refere-se a uma característica intrínseca do modelo, assim como o formato da montanha demonstra-se como uma condição fixa, insensível a qualquer desejo externo.

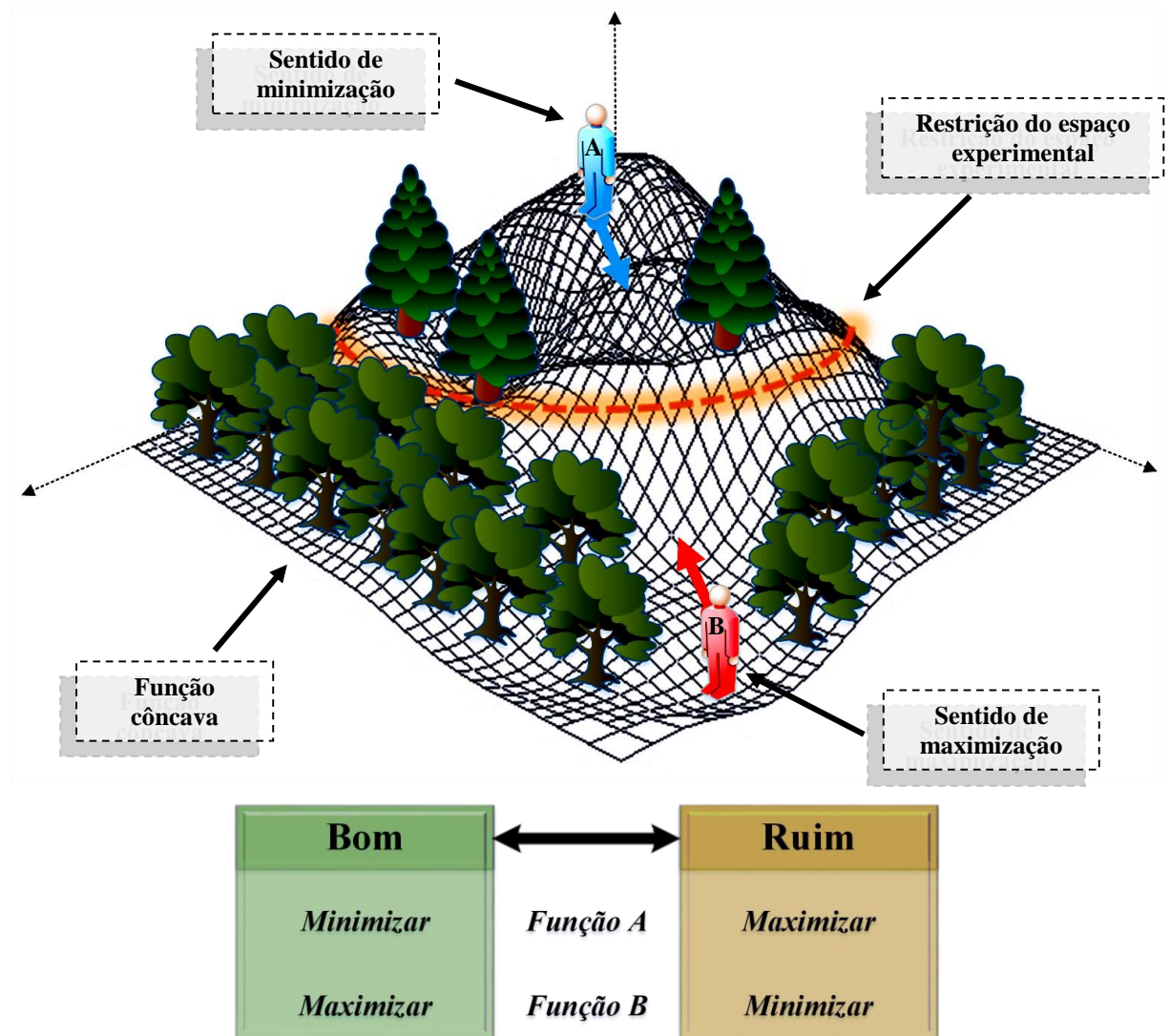


Figura 2.7 - Relação entre convexidade das funções, sentido de otimização do problema e restrição do espaço experimental

Fonte: Autoria própria (2018)

Nesse sentido, a Figura 2.7 também expressa a vontade de dois indivíduos (A e B), os quais, como parte externa a montanha (isto é, extrinsecamente), desejam descê-la ou subi-la. No universo da MSR, caso a função deva ser minimizada, tem-se o sentido de minimização (indivíduo A). Semelhantemente, caso a função deva ser maximizada, tem-se o sentido de maximização (indivíduo B).

Supondo que a Equação 2.6 forneça uma restrição do espaço experimental conforme indicado na Figura 2.7, a minimização ficará restrita a altura indicada pela curva de nível da montanha. Esse limite representaria a impossibilidade de acesso a alturas inferiores, dadas

determinadas barreiras físicas (como a presença de abismos, planícies, etc.). Em casos de torneamento, por exemplo, seria impossível atingir certos níveis de rugosidade dependendo do tipo de máquina utilizada.

Havendo um ponto de máximo global (característico da função côncava) e um sentido de maximização, a restrição do espaço experimental torna-se inativa. Isso ocorre porque o próprio ponto estacionário delimita a otimização. Ou seja, não há possibilidade de subir além do pico mais alto da montanha (Figura 2.7). Assim, o uso desse tipo de restrição, além de conduzir a soluções reais nos casos de incompatibilidade entre a convexidade e o sentido de otimização, não causa qualquer tipo de interferência quando esses aspectos se mostram harmônicos.

2.4 Múltiplas respostas

2.4.1 Características críticas dos processos

Os sistemas produtivos, por natureza, apresentam diversas características críticas. De modo geral, cada uma delas define um aspecto interveniente na qualidade dos produtos ou na eficiência dos processos. Em vista disso, tais atributos são normalmente tratados como variáveis de resposta (JOHNSON e WICHERN, 2007; MONTGOMERY, 2009)⁹.

Em processos de soldagem, por exemplo, a zona de fusão e a região termicamente afetada podem ser usadas para definir a qualidade do cordão de solda (KUMARA *et al.*, 2017). Para a síntese de biodiesel, porém, a porcentagem de combustível produzida pode caracterizar a eficiência do processo (ĐÄNG *et al.*, 2017).

Embora esses casos revelem diferentes tipos de respostas, muitos fatores podem ser usados para modelá-las e prevê-las. A Figura 2.8 ilustra algumas das variáveis que exercem influência sobre a rugosidade superficial de peças obtidas em processos de usinagem. Na maioria dos estudos, essa característica é usada para definir a qualidade dos itens fabricados (AZAM *et al.*, 2015; KANT e SANGWAN, 2014). Por esse motivo, Bajić *et al.* (2008, p. 331, tradução nossa) afirma que “[...] o maior indicador da qualidade da superfície de peças usinadas é a rugosidade superficial”¹⁰.

⁹ Em termos matemáticos, normalmente emprega-se a expressão “variáveis dependentes”. No entanto, também é comum encontrar a terminologia “variáveis de saída” em uma referência a lógica de processos. Em estudos de Metodologia de Superfície de Resposta, geralmente utiliza-se a nomenclatura “variáveis de resposta”. Todos esses termos, porém, referem-se ao mesmo conceito.

¹⁰ “[...] the major indicator of surface quality on machined parts is surface roughness”.

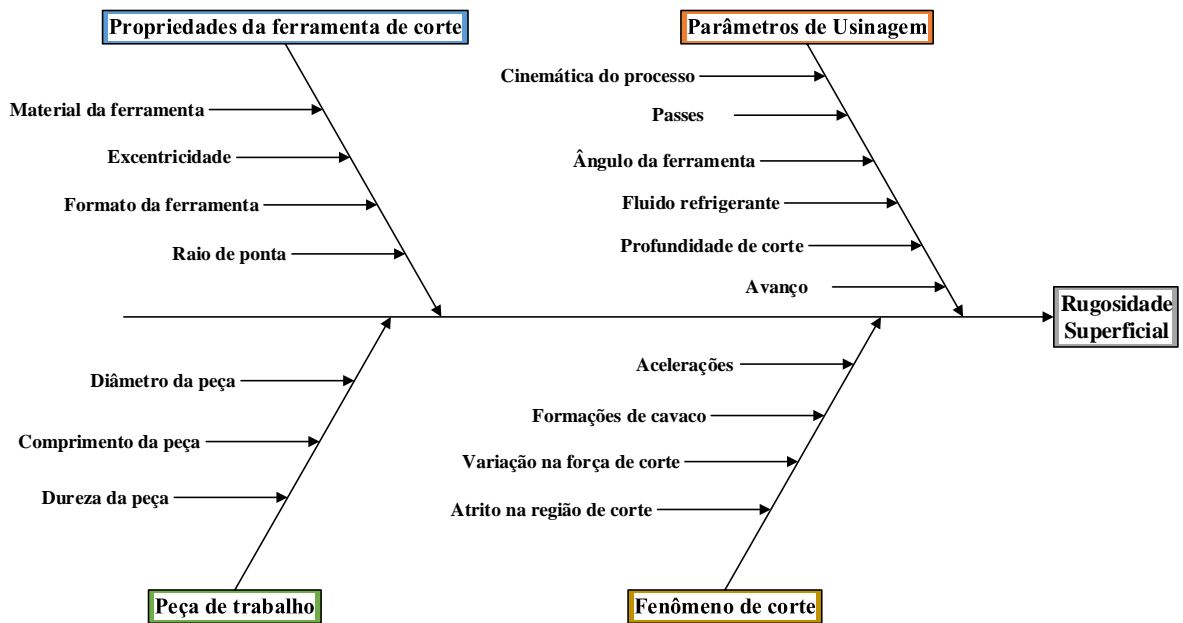


Figura 2.8 - Diagrama de causa e efeito para fatores influentes sobre a rugosidade superficial de peças usinadas

Fonte: Adaptado de Bernardos e Vosniakos (2003)

De fato, essa variável de resposta mostra-se como um atributo indispensável à qualidade. No entanto, muitos outros aspectos representam o processo de usinagem. À exemplo disso, a literatura revela o desgaste e a vida da ferramenta, as forças e a temperatura de corte, bem como as propriedades do cavaco (MIA *et al.*, 2017).

Na fase de otimização, quando tratadas conjuntamente, essas respostas configuram os problemas multiobjetivos. Nesses casos, cada uma das variáveis de resposta torna-se um objetivo de otimização distinto que atua sobre o mesmo processo produtivo e passa a envolver, coletivamente, todos os aspectos tratados na seção 2.3. Com isso, as soluções revelam níveis muito superiores de complexidade. Segundo Rao (2009, p. 9, tradução nossa), isso ocorre porque “com múltiplos objetivos cresce a possibilidade de conflito [...]”¹¹.

Em um processo de soldagem P-GMAW, por exemplo, pode-se desejar maximizar a penetração, a área total e o comprimento do cordão de solda e, concomitantemente, minimizar o reforço e o índice de convexidade (ROCHA *et al.*, 2015). Em usinagem, por outro lado, pode-se almejar os valores mínimos de rugosidade, tempo de corte, tempo total e custo e, paralelamente, o valor máximo da taxa de remoção de material (PAIVA *et al.*, 2007).

¹¹ “With multiple objectives there arises a possibility of conflict [...]”.

$$\text{Encontre } \mathbf{X} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix} \text{ que minimiza } f(\mathbf{X}) \quad (2.21)$$

Sujeito a:

$$g_j(\mathbf{X}) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m$$

$$l_j(\mathbf{X}) \leq 0, j = 1, 2, \dots, p$$

onde:

\mathbf{X} é o vetor de fatores da matriz experimental;

$f(\mathbf{X})$ é a função objetivo; e

$g_j(\mathbf{X})$ e $l_j(\mathbf{X})$ são restrições de desigualdade e igualdade, respectivamente.

$$f(\mathbf{X}) = \alpha_1 f_1(\mathbf{X}) + \alpha_2 f_2(\mathbf{X}) \quad (2.22)$$

onde:

$f(\mathbf{X})$ é a função objetivo resultante da combinação linear;

$f_1(\mathbf{X})$ e $f_2(\mathbf{X})$ representam duas funções objetivos distintas; e

α_1 e α_2 são constantes que denotam a importância relativa das funções $f_1(\mathbf{X})$ e $f_2(\mathbf{X})$.

Dessa forma, a existência de múltiplas respostas coloca o sentido de otimização como um primeiro obstáculo a soluções convencionais. De acordo com Rao (2009, p. 9, tradução nossa), “um meio simples de se lidar com o problema é construir uma função objetivo geral como uma combinação das múltiplas funções objetivo conflitantes”. Convencionalmente, os métodos de otimização propõem a minimização da função global obtida (MIETTINEN, 1999), definindo o problema genérico expresso pelas Equações 2.21 e 2.22 (RAO, 2009).

2.4.2 A presença de correlação entre modelos

Muito embora isso se apresente como uma alternativa satisfatória, no contexto da otimização multiobjetivo, a presença de correlação surge como um impedimento ao uso da Equação 2.22, dada a formação de dependência linear. Como resultado, os modelos matemáticos oriundos dessa combinação podem apresentar instabilidade, sobre-ajuste e/ou imprecisão (BRATCHELL, 1989; PAIVA *et al.*, 2009). Por esse motivo, as técnicas multivariadas têm sido utilizadas para a obtenção

de funções linearmente independentes, capazes de representar as funções correlacionadas, sem que seu significado original seja perdido (JOHNSON e WICHERN, 2007).

Purkayastha *et al.* (2015), por exemplo, aplicaram a Análise de Componentes Principais (PCA) em oito respostas correlacionadas de um processo químico. Gomes *et al.* (2012) se utilizaram do mesmo método para tratar quatro respostas provenientes do torneamento do aço AISI 12L14. Routara *et al.* (2010), com base em uma análise ponderada (WPCA), abordaram quatro respostas de um processo de retífica de uma liga UNS C34000 Brass. Em termos gerais, a partir dessas técnicas, foram criadas “variáveis não-correlacionadas como composições lineares das variáveis originais”¹² (SALMASNIA *et al.*, 2013, tradução nossa).

3 QUESTÕES E HIPÓTESES DO PROBLEMA

Uma vez que a Metodologia de Superfície de Resposta constitui-se de um método estruturado, como foi detalhado na seção 2, o presente trabalho visa responder a treze questões de pesquisa, que envolvem os oito aspectos críticos debatidos nas seções 1 e 2, a fim de compor um panorama das aplicações na área de manufatura. O Quadro 3.1 apresenta essas questões, bem como as hipóteses associadas e as seções nas quais as análises estatísticas encontram-se fundamentadas e discutidas.

Quadro 3.1 - Questões de pesquisa, hipóteses do problema e correspondência aos fundamentos e aos resultados da pesquisa

Item ^a	Questões	Hipóteses	Correspondência	
			Aos fundamentos	Aos resultados
NVE	Q1. Qual o número típico de variáveis de controle envolvido nos processos de manufatura?	H1. A maior parte dos processos de fabricação possui número de parâmetros de controle igual ou inferior a cinco unidades.	Seções 2.1 e 2.2	Seção 5.2.1

¹² “[...] uncorrelated variables which are linear composites of the original variables”.

Quadro 3.1 - Questões de pesquisa, hipóteses do problema e correspondência aos fundamentos e aos resultados da pesquisa (Continuação)

NVE	Q2. Qual o número típico de pontos fatoriais e axiais utilizados em cada categoria de variáveis de entrada ($k=2, 3, 4, \dots$)?	H2. A maior parte dos trabalhos utiliza a quantidade de pontos fatoriais e axiais prescrita na literatura, para as diferentes categorias de variáveis de entrada.	Seção 2.2	Seção 5.2.2
NPC	Q3. Qual o número típico de pontos centrais utilizados em cada categoria de variáveis de entrada ($k=2, 3, 4, \dots$)?	H3. A maior parte dos trabalhos utiliza a quantidade de pontos centrais prescrita na literatura, para as diferentes categorias de variáveis de entrada.	Seção 2.2	Seção 5.2.2
NVR	Q4. Qual o número típico de variáveis de resposta envolvido nos processos de manufatura?	H4. A maior parte dos processos de fabricação mensura múltiplas variáveis de resposta.	Seção 2.4	Seção 5.2.3.1
CR	Q5. Qual o número típico de pares de modelos correlacionados nos processos de manufatura?	H5. A maior parte dos pares de modelos utilizados em manufatura apresenta correlação significativa.	Seção 2.4	Seção 5.2.3.2
RC	Q6. A modelagem é realizada apenas em regiões de curvatura?	H6. A maior parte dos trabalhos realiza a modelagem e a otimização apenas em regiões de curvatura.	Seção 2.2	Seção 5.2.4.1
RC CF	Q7. Existe associação entre curvatura e convexidade?	H7. Há particularidades ou distorções nos modelos estimados em regiões sem curvatura.	Seções 2.2 e 2.3	Seção 5.2.4.1
CF	Q8. Há preponderância de um dos tipos de convexidade?	H8. A maior parte dos modelos apresenta formato de sela.	Seção 2.3	Seção 5.2.4.2
CF	Q9. Existe associação entre convexidade e rotacionalidade?	H9. Há particularidades ou distorções nos modelos com rotacionalidade modificada.	Seções 2.2 e 2.3	Seção 5.2.4.2
CF	Q10. Existe associação entre convexidade e os termos utilizados nos modelos?	H10. Há particularidades ou distorções nos modelos reduzidos.	Seções 2.1 e 2.3	Seção 5.2.4.2

Quadro 3.1 - Questões de pesquisa, hipóteses do problema e correspondência aos fundamentos e aos resultados da pesquisa (Continuação)

SO	Q11. Há preponderância de um dos sentidos de otimização?	H11. Os sentidos de minimização e maximização ocorrem com a mesma frequência em trabalhos de manufatura.	Seção 2.3	Seção 5.2.4.3
CF SO	Q12. O sentido de otimização dos processos é compatível com a convexidade dos modelos?	H12. A maior parte dos processos desejam minimizar modelos convexos e maximizar modelos côncavos.	Seção 2.3	Seção 5.2.4.3
REE	Q13. Na etapa de otimização, é utilizada restrição do espaço experimental?	H13. Quando o sentido de otimização é incompatível com a convexidade dos modelos, a maior parte dos trabalhos emprega restrição do espaço experimental.	Seção 2.3	Seção 5.2.4.3

^a Neste quadro, os itens apresentados referem-se aos aspectos críticos levantados na Figura 1.3 da seção 1.1, a saber: Número de Variáveis de Entrada (NVE), Número de Pontos Centrais (NPC), Número de Variáveis de Resposta (NVR), Correlação entre as Respostas (CR), Regiões de Curvatura (RC), Convexidade das Funções (CF), Sentido de Otimização (SO) e Restrição do Espaço Experimental (REE).

Fonte: Autoria própria (2018)

4 MÉTODO DE PESQUISA

4.1 Natureza teórica e classificação do estudo

Uma vez que o presente trabalho pretende responder a questões de pesquisa a partir de consulta a um conjunto de artigos da área de manufatura, este constitui-se de um estudo quantitativo do gênero levantamento (FORZA, 2002). Dadas suas características metodológicas, pode-se atribuí-lo, conceitualmente, como uma pesquisa científica de caráter exploratório (GIL, 2002; MARTINS *et al.*, 2014).

4.2 Critérios de busca e seleção dos trabalhos

A fim de se investigar adequadamente os aspectos críticos levantados nas seções 2 e 3, foram estabelecidos alguns critérios para busca e seleção dos trabalhos. Em primeiro lugar, foram analisados periódicos de circulação internacional que tratavam, conjuntamente, sobre a Metodologia de Superfície de Resposta e o Arranjo Composto Central.

Para essa investigação, portanto, foi utilizada a base acadêmica *Scopus*, por se tratar de uma das coleções com maior densidade de artigos científicos (CHADEGANI *et al.*, 2013; GUZ e RUSHCHITSKY, 2009). Com isso, definiram-se os termos “*Response Surface Methodology*” e “*Central Composite Design*” como critérios de busca em todos os campos. Paralelamente, a busca foi restringida apenas a artigos, desconsiderando-se livros e outros tipos de documentos disponíveis.

Assim, de 1971 a 2016, foram identificados 6.740 artigos no tema. Acrescentando-se o termo “*Manufacturing*” como um terceiro critério de busca, porém, constataram-se 735 publicações entre 1987 e 2016. Com essa análise, quatro periódicos se mostraram com densidade de publicações superior a 10 artigos. Dentre eles, o *International Journal of Manufacturing Technology – IJAMT* apresentou o maior número de publicações, superando em 74,42% a soma de artigos publicados pelos demais (*Materials And Manufacturing Processes*, *Journal Of Hazardous Materials* e *Bioresource Technology*).

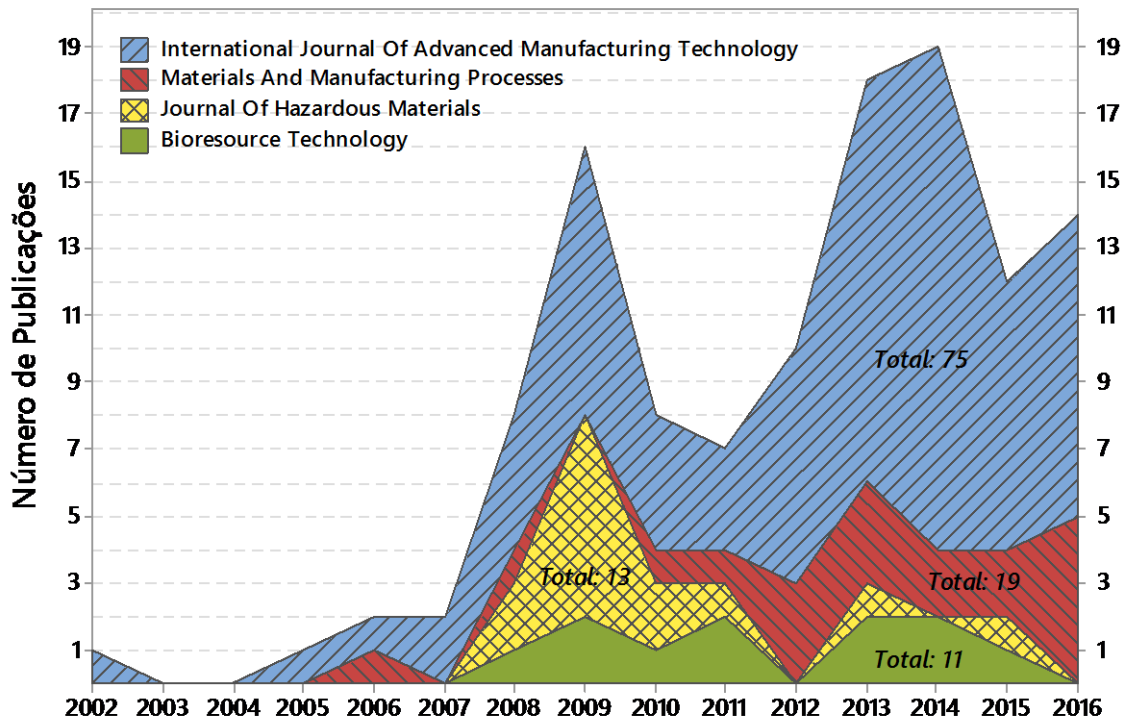


Figura 4.1 - Número de artigos publicados por ano nos periódicos de maior densidade sobre Metodologia de Superfície de Resposta e Arranjo Composto Central

Fonte: Autoria própria (2018)

A Figura 4.1 fornece um comparativo entre eles e permite verificar tanto o número de artigos publicados em cada ano como o volume total de publicações. A partir disso, pode-se observar que o *IJAMT* se manteve com a maior densidade de publicações desde o início do período, contribuindo, fundamentalmente, para seu desempenho no somatório geral.

Ao se reproduzir a análise supradescrita na base acadêmica *Web of Science*, foram obtidos resultados semelhantes, embora em proporções diminutas. Com os termos “*Response Surface Methodology*” e “*Central Composite Design*”, foram observadas 4.024 publicações entre os anos de 1973 e 2016. Adicionando-se o termo “*Manufacturing*”, por outro lado, esse número foi reduzido a apenas 55 artigos, publicados entre 1993 e 2016.

Como ocorreu na coleção *Scopus*, o *IJAMT* também liderou o volume de publicações na *Web of Science* com quatro artigos, sendo seguido pelo *Journal Of The Taiwan Institute Of Chemical Engineers* com três e pelos periódicos *Bioresource Technology*, *Food Chemistry* e *Journal Of Manufacturing Processes* com dois artigos cada um. Todas as demais fontes contribuíram, isoladamente, com apenas um artigo ao longo do período.

Embora uma consulta a bases acadêmicas não resulte, necessariamente, na totalidade das publicações sobre o tema, a maioria delas tende a demonstrar uma relação de proporcionalidade. Assim, a análise da Figura 4.1 não pretende indicar, com exatidão, a presença de apenas 75 artigos na história do *IJAMT*. No entanto, busca ilustrar a proeminência desse periódico, dada a dificuldade em se reunir todas as publicações relacionadas a um determinado objeto de estudo. Esse fato constitui-se de uma das principais vantagens das pesquisas bibliométricas (GUZ e RUSHCHITSKY, 2009).

Nesse sentido, a presente análise adotou o *IJAMT* como única fonte para seleção dos trabalhos. Conquanto fosse possível diversificar os periódicos, optou-se por compatibilizar uma análise de máxima consistência com o tempo disponível para a pesquisa. Em outras palavras, este trabalho concentrou seus esforços na avaliação sistemática da fonte de maior vulto numérico, possibilitando uma compreensão mais aprofundada de suas aplicações, como será apresentado ao longo da seção 5.

Especificamente, os termos “*Response Surface Methodology*” e “*Central Composite Design*” foram utilizados como critérios de busca no interior desse periódico. Ao mesmo tempo, considerou-se uma janela temporal de 2014 a 2017, com o objetivo de se avaliar as aplicações mais recentes da MSR com CCD em manufatura. Nesse período, foram obtidos 101 trabalhos, os quais representam mais da metade do total de publicações do *IJAMT* no tema, cujo acervo responde por 199 trabalhos publicados entre 1999 e janeiro de 2017.

4.3 Catalogação dos trabalhos e testes de hipóteses

Esta seção destina-se ao tratamento dos dados obtidos por meio dos procedimentos apresentados na seção 4.2. Para isso, são detalhadas a organização e a catalogação dos trabalhos (seção 4.3.1), bem como discutidos os principais aspectos dos testes de hipóteses utilizados (seção 4.3.2).

4.3.1 Organização e catalogação dos trabalhos

Uma vez obtidos os trabalhos a partir da plataforma *online* do *IJAMT*, cada um deles foi organizado e catalogado segundo cinco categorias. A Figura 4.2 ilustra o resultado desse processo. Inicialmente, foram segregados aqueles trabalhos que, embora tenham mencionado os termos de busca apresentados na seção 4.1, empregaram propostas diversas daquela idealmente pretendida. Nesses casos, foi atribuído o título “Outros tipos de estudo”. Apesar dessa classificação, apenas o trabalho de Omrani *et al.* (2016) pode ser enquadrado nessa categoria, haja vista a realização de uma revisão de literatura.

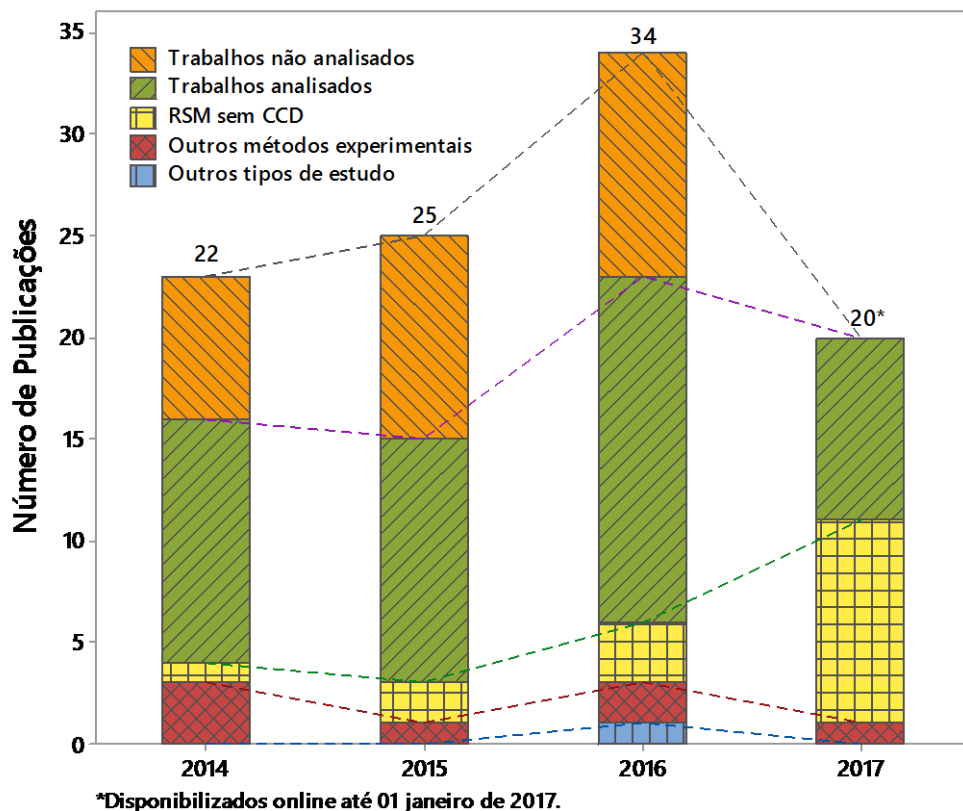


Figura 4.2 - Categorização dos trabalhos disponíveis em cada ano

Fonte: Autoria própria (2018)

Da mesma forma, embora tenham proposto a otimização de processos, alguns estudos não se utilizaram da Metodologia de Superfície de Resposta. Sem embargo, grande parte deles aplicou o Método de Taguchi (EKICI e MOTORCU, 2014; PAKSERESHT *et al.*, 2014). Um único artigo, porém, utilizou-se de um arranjo fatorial para a determinação dos parâmetros de maior influência sobre um processo de furação (KHORAN *et al.*, 2015). Esses casos foram catalogados como “Outros métodos experimentais”.

Na direção oposta, a maior parcela dos trabalhos acessados empregou a Metodologia de Superfície de Resposta. Assim, quando da não utilização do Arranjo Composto Central, criou-se a categoria “RSM sem CCD”. Por outro lado, quando das aplicações de interesse, estas foram divididas em “Trabalhos analisados” e “Trabalhos não analisados”.

Ao todo, de 77 publicações que efetivamente aplicaram a MSR com Arranjo Composto Central, foram analisados 49 artigos, dos quais 12 foram publicados em 2014, 12 em 2015 e 17 em 2016, mantendo-se uma proporção de análise em torno de 60% das bases disponíveis nesses anos. Em 2017, excepcionalmente, foram analisados 9 artigos, os quais respondem por 100% das publicações disponíveis no tema proposto. Em termos percentuais, foram analisadas 63,64% das publicações do período.

4.3.2 Testes de Hipóteses

Testes de hipóteses são análises estatísticas comumente utilizadas em estudos de natureza quantitativa, com o objetivo de se avaliar a influência de um ou mais fatores testados sobre um efeito conhecido. Frequentemente, uma característica crítica de um processo ou o resultado de fenômeno científico é examinado em relação a diferentes níveis de seus fatores, também denominados tratamentos (MONTGOMERY, 2009).

Embora média e variância sejam parâmetros popularmente debatidos, muitas aplicações são caracterizadas em termos de proporções. Nesses casos, testes convencionais, como análise de variância e *t* de Student, nem sempre podem ser empregados, tendo em vista que consideram a presunção de normalidade e/ou outros requisitos de cálculo. Com isso, abordagens alternativas são apresentadas na literatura como soluções mais adequadas para esses tipos de problemas.

Neste trabalho, a fim de se testar cada uma das hipóteses enunciadas na seção 3, foram utilizados dois testes, que englobam diferentes particularidades estatísticas. A seção 4.3.3.1, em princípio, detalha os fundamentos do teste para proporções, enquanto a seção 4.3.3.2, em seguida, embasa os testes Qui-Quadrado. Em ambos os casos, são indicadas as principais formulações dos testes e esclarecidas suas circunstâncias de aplicação.

4.3.2.1 Testes para proporções

Em geral, quando da comparação de duas proporções (observada e hipotética ou observadas em duas amostras distintas), empregam-se, com toda lógica, os chamados “testes para proporções” (MONTGOMERY e RUNGER, 2016). A depender dos pressupostos adotados, esses testes podem considerar distribuições binomiais e, a partir delas, construir estatísticas por aproximações normais (RYAN, 2009). No entanto, também podem estabelecer estatísticas mais “exatas”, utilizando-se, por exemplo, da razão de verossimilhanças (DASGUPTA, 2008).

No presente trabalho, para os casos em que há apenas dois tipos de resultados possíveis, como “sim ou não”, “ocorre ou não ocorre” e “contém ou não contém”, são presumidos parâmetros constantes e distribuições binomiais. A Equação 4.1 expressa a função de massa de probabilidade para modelos estatísticos do gênero (CASELLA e BERGER, 2011). A Equação 4.2, por sua vez, apresenta a formulação geral do teste de hipóteses.

$$f(x) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}, \quad \forall x \in \mathbb{N} \quad (4.1)$$

onde:

n é o número de tentativas; e

p é a probabilidade do evento (qual seja: sucessos ou fracassos).

$$\begin{aligned} H_0: p &= p_o \\ H_1: p &\neq p_o \text{ ou } H_1: p < p_o \text{ ou } H_1: p > p_o \end{aligned} \quad (4.2)$$

onde:

p é o parâmetro que descreve uma proporção populacional desconhecida; e

p_o é um valor hipotético para o parâmetro.

Na tentativa de se testar as hipóteses indicadas pela Equação 4.2, muitas abordagens podem ser empregadas, como foi discutido no preâmbulo da seção 4.3.3. No entanto, devido às limitações dos métodos aproximados (RYAN, 2009), foram adotados cálculos exatos em todos os casos. Dessa forma, como as hipóteses deste trabalho avaliam a superioridade dos valores testados em relação aos valores hipotéticos, cada teste foi conduzido segundo o conjunto de

Equações 4.3, que fornecem as diretrizes para obtenção do *p-value* (MONTGOMERY e RUNGER, 2016).

Em uma formulação inicial, tem-se a expressão:

$$P(Y > y | p = p_0) = \sum_{x=y}^{\infty} \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}, \quad (4.3.1)$$

donde se infere que:

$$P(Y > y | p = p_0) = 1 - P(Y \leq y | p = p_0), \quad (4.3.2)$$

e, portanto:

$$P(Y > y | p = p_0) = 1 - \sum_{x=0}^y \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}, \quad (4.3.3)$$

onde:

Y é uma variável aleatória com distribuição binomial de parâmetro $p = p_0$; e y é o valor assumido pela variável aleatória Y no intervalo considerado.

Utilizando-se da Equação 4.3.3, rejeita-se a hipótese nula formulada na Equação 4.2, quando o *p-value* for inferior a 5%. Em termos do método “exato”, isso significa dizer que, em uma distribuição binomial de parâmetro igual a proporção hipotética p_0 , a probabilidade de ocorrência de valores superiores à estatística de teste \hat{p} é pequena. De modo análogo, quando a probabilidade de ocorrência de valores superiores à estatística de teste \hat{p} é grande (isto é, *p-value* é superior a 5%), diz-se que não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula.

4.3.2.2 Testes Qui-Quadrado

Embora os testes para proporções, apresentados na seção 4.3.3.1, sejam de grande utilidade prática, seu campo de aplicação restringe-se a apenas alguns tipos de estudos, uma vez que, dentre seus principais pressupostos, encontra-se a suposição de distribuições binomiais. Nesse cenário, somente duas proporções podem ser comparadas simultaneamente, conforme detalhado pelo conjunto de formulações 4.1, 4.2 e 4.3.

Em muitos casos, porém, uma amostra pode ser dividida em múltiplas frações, segundo um ou mais métodos classificatórios¹³. Nessas situações, não há interesse em verificar somente se uma proporção amostral é estatisticamente superior, inferior ou igual a uma proporção hipotética. Em uma perspectiva mais ampla, pretende-se comparar perfis de múltiplas propoções, na tentativa de se inferir sobre a influência dos métodos investigados.

Nesse contexto, os testes Qui-Quadrado constituem-se de uma alternativa estatística para a comparação entre proporções multinomiais observadas e esperadas. Em geral, quando as proporções se originam de apenas um critério ou método de classificação, os chamados “testes de aderência” ou “testes de qualidade de ajuste” Qui-Quadrado são comumente utilizados, a fim de se testar as hipóteses enunciadas pela Equação 4.4 (MONTGOMERY e RUNGER, 2016).

$$\begin{aligned} H_0: & \text{ Os dados seguem uma distribuição multinomial com certas proporções} \\ H_1: & \text{ Os dados não seguem uma distribuição multinomial com certas proporções} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Originalmente, a estatística de teste para esse tipo de problema foi proposta por Karl Pearson ainda no século XIX e pode ser expressa pela Equação 4.5, que considera uma notação mais atualizada (PEARSON, 1900). Em bases conceituais, essa formulação permite determinar se o desvio entre frequências esperadas e observadas é estatisticamente provável de ocorrer (PLACKETT, 1983).

$$\chi_0^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (4.5)$$

onde:

O_i representa os valores observados;

E_i representa os valores esperados; e

n representa o número total de dados.

¹³ A depender da literatura adotada, a terminologia usada para esse conceito pode ser bastante vasta, sendo denominada “característica ou atributo” no trabalho de Pearson (1904), “variáveis” em Hamdan e Tsokos (1971), “variáveis categóricas” em Agresti (2002) e “métodos de classificação” em Montgomery e Runger (2016). A fim de se evitar conflitos de natureza semântica com outras definições apresentadas neste trabalho, optou-se por utilizar a terminologia de Montgomery e Runger (2016) ou expressões equivalentes.

Em paralelo, quando as amostras podem ser classificadas de acordo com múltiplos critérios, os chamados “testes de independência” ou “testes de associação” Qui-Quadrado permitem uma avaliação mais adequada das proporções envolvidas nos problemas (BOX *et al.*, 2005; MONTGOMERY e RUNGER, 2016).

O enunciado desse tipo de teste pode ser expresso segundo a Equação 4.6. A partir dela, a hipótese nula (H_0) manifesta a independência entre dois métodos genéricos (A e B), enquanto a hipótese alternativa (H_1) apresenta o cenário oposto, no qual se levanta a possibilidade de algum tipo de associação entre eles.

$$\begin{aligned} H_0: & \text{O método A é independente do método B} \\ H_1: & \text{O método A não é independente do método B} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Nesses casos, geralmente são empregadas tabelas de contingência, em cujas células devem-se registrar os desvios dos valores observados em relação àqueles tidos como prováveis, conforme introduzido por Karl Pearson em outro de seus notórios trabalhos (PEARSON, 1904). A estatística de teste, então, é dada segundo a Equação 4.7 e resulta em uma generalização da Equação 4.5 para duas variáveis.

$$\chi_0^2 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}} \quad (4.7)$$

onde:

O_i representa os valores observados;

E_i representa os valores esperados;

r representa o número de dados das linhas; e

c representa o número de dados das colunas.

Eu defino qualquer medida do desvio total da classificação de probabilidade independente uma medida de sua *contingência*. Claramente quanto maior a contingência, maior deve ser a quantidade de associação ou de correlação entre os dois atributos, pois essa associação ou correlação é apenas uma medida de outro ponto de vista do grau de desvio da independência de ocorrência (PEARSON, 1904, p. 5, tradução nossa).¹⁴

¹⁴ I term any measure of the total deviation of the classification from independent probability a measure of its *contingency*. Clearly the greater the contingency, the greater must be the amount of association or of correlation between the two attributes, for such association or correlation is solely a measure from another standpoint of the degree of deviation from independence of occurrence.

Embora Pearson tenha se referido a apenas dois atributos, quando da existência de uma quantidade maior de métodos classificatórios, uma alternativa conveniente para o tratamento estatístico envolve o uso de avaliações “par a par”, considerando duas variáveis por vez. Assim, pode-se fazer uso das Equações 4.6 e 4.7 sem que haja prejuízo para a investigação dos fenômenos.

Para todas as situações tratadas nesta seção (contendo uma ou mais variáveis classificatórias), o cálculo do *p-value* pode ser expresso pela Equação 4.8, utilizando-se de $(n - 1)$ graus de liberdade para o caso de uma variável e $(r - 1)(c - 1)$ graus de liberdade para o caso de duas. Com 95% de confiança, se o *p-value* for inferior a 5%, diz-se que há evidências suficientes para se rejeitar a hipótese nula, enunciada pela Equação 4.4 ou pela Equação 4.6.

$$P(X > \chi_0^2) = \int_{x=\chi_0^2}^{+\infty} \frac{x^{(v-2)/2} e^{-x/2}}{2^{v/2} \Gamma(v/2)} dx \quad (4.8)$$

onde:

v representa o número de graus de liberdade; e

Γ representa a função Gama.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Principais observações e descrição dos trabalhos

Neste trabalho, foram analisadas diferentes aplicações da Metodologia de Superfície de Resposta na área de manufatura avançada. Embora esse campo envolva um enorme conjunto de processos industriais, a presente análise utiliza essa terminologia apenas para identificar os estudos encontrados a partir dos procedimentos da seção 4.

Em outras palavras, uma vez que esta pesquisa realiza um estudo de natureza exploratória envolvendo aspectos críticos da MSR, as investigações conduzidas não cobrem todos os processos existentes nesse ramo do conhecimento. No entanto, para efeito das questões de pesquisa suscitadas na seção 3, diversas aplicações são investigadas, desde processos de usinagem, soldagem e estampagem, até projetos de ferramentas, hidroconformação e fabricação de tubos. O Quadro 5.1 apresenta as principais informações catalográficas dos artigos analisados, associando autor(es) e ano de publicação com objeto de estudo e processo industrial.

Quadro 5.1 - Aplicações de manufatura avançada utilizadas na análise

Autoria e Ano	Objeto de Estudo / Processo Industrial
Aggarwal <i>et al.</i> (2015)	Usinagem por descarga elétrica de superliga Inconel 718
Ahmadnia <i>et al.</i> (2016)	Soldagem por fricção de ligas de alumínio AA6061 e AA5010
Amdouni <i>et al.</i> (2017)	Polimento por esferas de uma superfície plana usinada de liga de alumínio 2017A-T451
Araby <i>et al.</i> (2017)	Ranhura em formas cilíndricas por usinagem eletroquímica de arame em aço macio
Ayyappan e Sivakumar (2014)	Usinagem eletroquímica de liga de aço 20MnCr
Azam <i>et al.</i> (2015)	Torneamento de aço de baixa liga de alta resistência (AISI 4340) com ferramenta revestida de multiplas camadas de carboneto
Cai <i>et al.</i> (2016)	Hidroconformação de travessas automotivas de liga de alumínio 6063-T4
Costa <i>et al.</i> (2016b)	Torneamento de aço 12L14
Daoud <i>et al.</i> (2015)	Torneamento por corte ortogonal de ligas de alumínio Al2024-T3, Al6061-T6 e Al7075-T6
Guo <i>et al.</i> (2014)	Injeção de termoplástico de estrutura cristalina em moldes
Hasan <i>et al.</i> (2017)	Soldagem por fricção de ligas de alumínio AA7075 e AA6061
Hashmi <i>et al.</i> (2016)	Fresamento de ligas de titânio Ti-6Al-4V com insertos de carboneto
Hassan <i>et al.</i> (2017)	Teste de fração volumétrica de fibras em estruturas de compósitos poliméricos de aeronaves
Hosseinzadeh e Mouziraji (2016)	Conformação de tubos de seção quadrada a partir de tubos de seção circular de cobre puro
Hourmand <i>et al.</i> (2015)	Usinagem por descarga elétrica de um composto com matriz metálica de Al-Mg ₂ Si
Huang <i>et al.</i> (2016)	Estampagem profunda de liga de alumínio AA 5754-O
Jahanzaib <i>et al.</i> (2017)	Soldagem a plasma de aços de baixa liga e alta resistência (HSLA)
Jain e Pandey (2016)	Usinagem ultrassônica micro-rotativa (μ -RUM) de vidro de borossilicato BK7
Korra <i>et al.</i> (2015)	Soldagem A-TIG de aço inox duplex 2205
Liu e Kovacevic (2014)	Revestimento a laser de aço macio ASTM A36
Liu <i>et al.</i> (2014a)	Furação de materiais cerâmicos com usinagem ultrassônica
Liu <i>et al.</i> (2014b)	Brochamento de aço resistente ao calor X12CrMoWVNb N-10-1-1
Lotfi e Nourouzi (2014)	Soldagem por fricção de ligas de alumínio AA7075-T6
Mahesh <i>et al.</i> (2015)	Fresamento de acabamento em liga de alumínio Al 6063
Maji <i>et al.</i> (2016)	Conformação a laser de chapa de aço inoxidável AISI 304
Meddour <i>et al.</i> (2015)	Torneamento do aço endurecido AISI 52100 com ferramenta de cerâmica
Mostaan <i>et al.</i> (2016)	Soldagem por feixe de elétrons em folhas magnéticas ultrafinas de FeCo-V
Mostafapour <i>et al.</i> (2017)	Soldagem por fricção a ponto de chapas de aço TRIP
Pakseresht <i>et al.</i> (2015)	Pulverização à plasma de aço inox austenítico AISI 316
Rajakumar e Balasubramanian (2016)	Ligação por difusão (<i>diffusion bonding</i>) de ligas de titânio puro e alumínio AA7075

Quadro 5.1 - Aplicações de manufatura avançada utilizadas na análise (Continuação)

Rajesh <i>et al.</i> (2015)	Furação a laser de aço inox austenítico
Ramachandran <i>et al.</i> (2016)	Soldagem por fricção de ligas de alumínio AA5052H32
Rocha <i>et al.</i> (2017)	Torneamento de aço endurecido AISI H13 com ferramenta PCBN <i>wiper</i>
Safeen <i>et al.</i> (2016)	Soldagem por fricção de ligas de alumínio AA6061-T6
Shi <i>et al.</i> (2014)	Soldagem a laser de aço de alta resistência AH32
Sonawane e Joshi (2015)	Furação de vigas finas de superliga Inconel 718
Sundararaman <i>et al.</i> (2014)	Projeto de layout de montagem para operação de fresamento de acabamento
Varun e Venkaiah (2015)	Usinagem por descarga elétrica de aço cementado EM 353
Verma <i>et al.</i> (2017)	Projeto de ferramenta para acabamento por abrasão magnética de aço inox SS 304
Winiczenko (2016)	Soldagem por fricção de juntas de aço AISI 1020 e ASTM A536.
Xu <i>et al.</i> (2014)	Soldagem GMA de chapas de aço de baixo carbono
Yilmaz <i>et al.</i> (2014)	Furação de ligas aeroespaciais Inconel 718 Brass (D2NiBr)
Yue <i>et al.</i> (2014)	Torneamento a jato de água abrasivo de tarugos de cerâmica de alumina 96%
Zhang e Cong (2016)	Hidroconformação de chapas de aço inoxidável SUS304
Zhang <i>et al.</i> (2015)	Conexão de tubos serrilhados (recartilhados) de aço de árvore de cames
Zhang <i>et al.</i> (2016)	Hidroconformação de eixo de torção de 780 Mpa
Zhao <i>et al.</i> (2014)	Retificação e polimento de rotores de lâmina integral de titânio de aerogeradores
Zhao <i>et al.</i> (2017)	Soldagem por fricção de ligas de alumínio 2219-T87
Zhou <i>et al.</i> (2016)	Micro-usinagem de superligas monocristalinas à base de níquel DD98

Fonte: Autoria própria (2018)

5.2 Levantamento dos dados e avaliação de aspectos críticos

Nesta seção, são apresentadas as principais contribuições do presente trabalho. A fim de viabilizar a correta correspondência com as questões e hipóteses do problema levantadas na seção 3, esta seção foi dividida em quatro itens principais, por meio dos quais são discutidos todos os resultados deste estudo.

5.2.1 Variáveis de entrada ou parâmetros de controle

O número de variáveis de entrada utilizado em cada uma das publicações foi investigado sob múltiplos aspectos. Em uma análise do número típico desses parâmetros de controle, cada

um dos trabalhos foi categorizado dentro do intervalo de duas a seis variáveis, a corresponder, respectivamente, pelos números mínimo e máximo de variáveis encontrados.

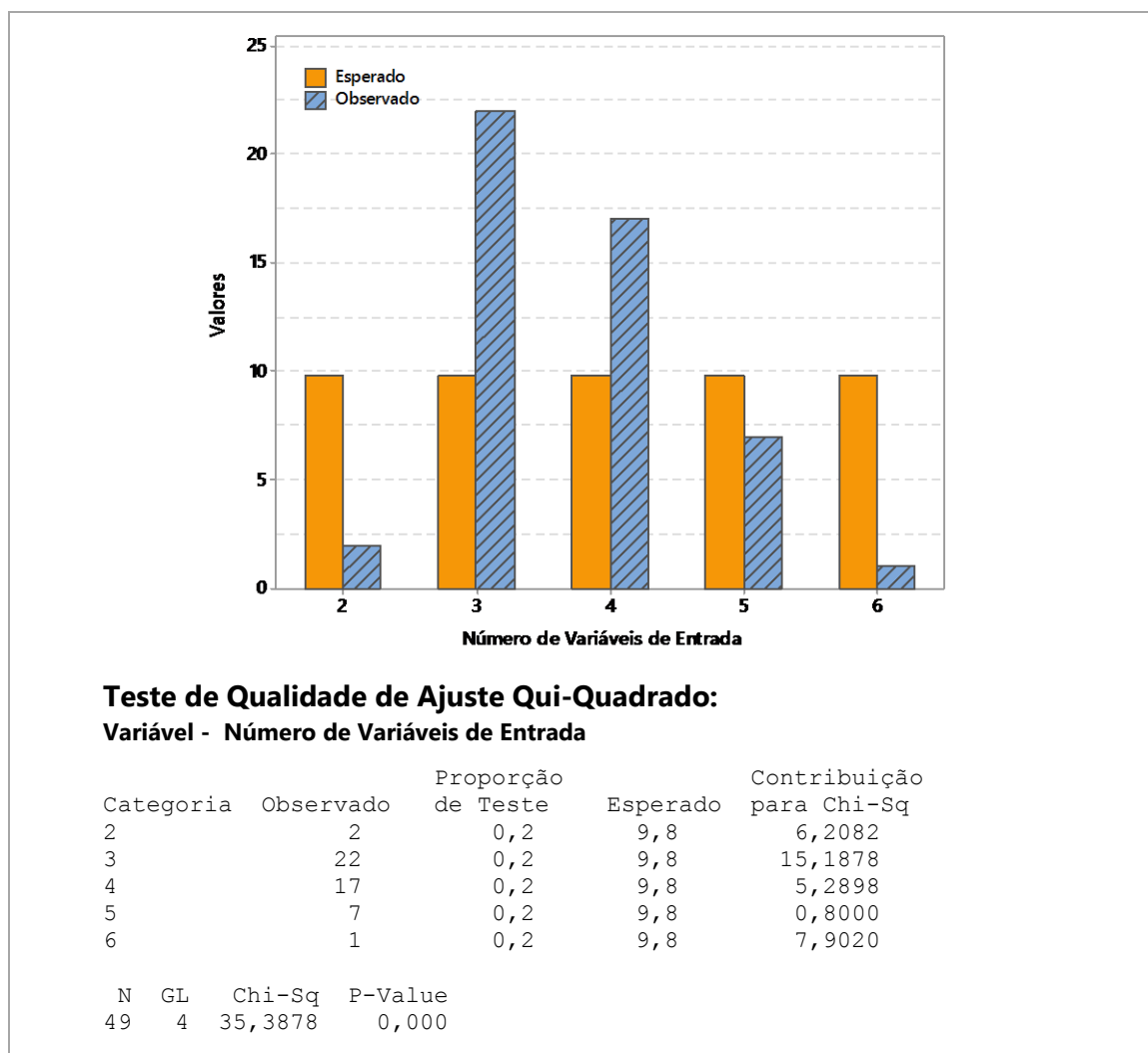


Figura 5.1 - Resultado do Teste Qui-Quadrado para o número de variáveis de entrada

Fonte: Autoria própria (2018)

A Figura 5.1 apresenta o resultado do teste de qualidade de ajuste Qui-Quadrado. Com base nele, pode-se constatar uma diferença significativa entre as categorias testadas. Ou seja, nos processos de manufatura avaliados, há preponderância de determinadas quantidades de variáveis de entrada.

Em termos específicos, a maior parte dos processos de fabricação possui três ou quatro parâmetros de controle. De modo oposto, é incomum a utilização de apenas duas ou mais de cinco variáveis. Essa tese pode ser corroborada através dos próprios trabalhos investigados, uma vez que, embora Aggarwal *et al.* (2015) tenham utilizado seis parâmetros de controle,

ajustaram modelos com apenas quatro fatores principais, trazendo ainda mais destaque para as categorias centrais da Figura 5.1.

Esse resultado confirma a primeira hipótese levantada na seção 3 (H1), por meio da qual se afirma que a maior parte dos processos de fabricação possui número de parâmetros de controle igual ou inferior a cinco unidades. Com isso, tem-se plena concordância com a literatura (MYERS e MONTGOMERY, 2009), haja vista que todos os processos investigados podem ser incluídos nesse quadro.

5.2.2 Número de experimentos e o uso de pontos fatoriais, axiais e centrais

Com o objetivo de se avaliar o número de pontos centrais convencionalmente empregado na literatura, os trabalhos foram estratificados por ano e quantidade de variáveis de entrada. No entanto, em termos estatísticos, apenas o conjunto de três e quatro variáveis possibilitou conclusões satisfatórias, uma vez que representam as categorias com maior densidade de publicações – conforme demonstrado na seção 5.2.1. Nesse processo, a fim de se ampliar os horizontes de análise, as demais tipologias de pontos também foram contabilizadas, a saber: fatoriais e axiais.

A Tabela 5.1 fornece as quantidades de experimentos sugeridas na literatura para cada uma dessas categorias, segundo as formulações dispostas na seção 2.2 e os valores sugeridos pelo pacote comercial *Minitab* para a adição de pontos centrais. Com isso, também apresenta a frequência de concordância dos trabalhos (f_o), indicando o número de vezes em que os valores propostos na literatura foram respeitados.

Muito embora as informações sejam expostas em uma janela temporal, as análises foram conduzidas em termos do total de publicações, na tentativa de se obter conclusões mais consistentes. Além disso, dada a comparação com os valores sugeridos na literatura, foram considerados apenas os trabalhos que empregam arranjos fatoriais completos sem réplica. Isto é, dos 49 trabalhos estudados, somente 40 foram testados quanto ao uso de pontos dos arranjos experimentais.

A fim de se avaliar as frequências dispostas na Tabela 5.1, foram conduzidos testes para proporções. A partir disso, há evidências suficientes para concluir que, em processos de manufatura, os pontos fatoriais e axiais são corretamente utilizados, independentemente do número de variáveis de entrada, o que confirma a segunda hipótese da seção 3 (H2).

Tabela 5.1 - Teste para proporções de experimentos compatíveis com a literatura por tipologia de pontos e número de variáveis de entrada (VE)^a

Experimentos	Literatura	2014		2015		2016		2017		Total				
		N	f _o	N	f _o	N	f _o	N	f _o	N	f _o	P	Limite Inferior 95%	p-value
Total														
2 ^c (VE)	13	0	0	0	0	2	2	0	0	2	2	1,000	0,223607	0,250
3	20	5	3	3	1	6	5	5	3	19	12	0,632	0,418064	0,180
4	31	4	1	4	1	5	2	3	2	16	6	0,375	0,177766	0,895
5	52	2	1	0	0	1	0	0	0	3	1	0,333	0,016952	0,875
										40	21	0,525	0,384797	0,437
Fatoriais														
2 (VE)	4	0	0	0	0	2	2	0	0	2	2	1,000	0,223607	0,250
3	8	5	5	3	3	6	6	5	5	19	19	1,000	0,854131	0,000
4	16	4	4	4	4	5	5	3	3	16	16	1,000	0,829250	0,000
5	32	2	2	0	0	1	1	0	0	3	3	1,000	0,368403	0,125
										40	40	1,000	0,927842	0,000
Centrais^b														
2 ^c (VE)	5	0	0	0	0	2	2	0	0	2	2	1,000	0,223607	0,250
3	6	5	3	3	1	6	5	5	3	19	12	0,632	0,418064	0,180
4	7	4	1	4	1	5	2	3	2	16	6	0,375	0,177766	0,895
5	10	2	1	0	0	1	0	0	0	3	1	0,333	0,016952	0,875
										40	21	0,525	0,384797	0,437
Axiais														
2 (VE)	4	0	0	0	0	2	2	0	0	2	2	1,000	0,223607	0,250
3	6	5	5	3	3	6	6	5	5	19	19	1,000	0,854131	0,000
4	8	4	4	4	4	5	5	3	3	16	16	1,000	0,829250	0,000
5	10	2	2	0	0	1	1	0	0	3	3	1,000	0,368403	0,125
										40	40	1,000	0,927842	0,000

^a Nesta análise, foram considerados apenas os trabalhos que empregam arranjos fatoriais completos sem réplica, dada a comparação com os valores sugeridos na literatura. ^b No caso dos pontos centrais, foram adotados os valores sugeridos pelo pacote comercial *Minitab - Versão 16*. ^c Em virtude da menor densidade de publicações, as categorias com duas ou cinco variáveis de entrada não apresentam resultados satisfatórios

Fonte: Autoria própria (2018)

Esse fato pode ser facilmente verificado ao se comparar a frequência observada com o número de trabalhos analisados em cada categoria, resultando em *p-values* inferiores a 5% nas aplicações com três e quatro variáveis de entrada. Além disso, uma vez que em todas as categorias houve plena correspondência com valores propostos na literatura, espera-se obter a mesma demonstração estatística para uma quantidade maior de trabalhos nas categorias com duas e cinco variáveis de entrada.

Tabela 5.2 - Mediana e intervalo interquartil para a quantidade de experimentos usada nos trabalhos analisados por tipologia de pontos e número de variáveis de entrada (VE) em cada um dos anos

Experimentos	Literatura	2014			2015			2016			2017			Total		
		<i>N</i>	<i>Mediana</i>	<i>IIQ</i>	<i>N</i>	<i>Mediana</i>	<i>IIQ</i>	<i>N</i>	<i>Mediana</i>	<i>IIQ</i>	<i>N</i>	<i>Mediana</i>	<i>IIQ</i>	<i>N</i>	<i>Mediana</i>	<i>IIQ</i>
Total^a																
2 (VE)	13	0	-	-	0	-	-	2	13	-	0	-	-	2	13	-
3	20	5	20	4,00	3	18	4,00	6	20	0,75	5	20	1,50	19	20	2,00
4	31	4	30	0,75	2	28,5	4,50	5	30	6,00	3	31	1,00	14	30	3,25
5	52	2	51	-	0	-	-	1	43	-	0	-	-	3	50	9,00
Fatoriais^a																
2 (VE)	4	0	-	-	0	-	-	2	4	-	0	-	-	2	4	-
3	8	5	8	0,00	3	8	0,00	6	8	0,00	5	8	0,00	19	8	0,00
4	16	4	16	0,00	2	16	0,00	5	16	0,00	3	16	0,00	14	16	0,00
5	32	2	32	-	0	-	-	1	32	-	0	-	-	3	32	0,00
Centrais^b																
2 (VE)	5	0	-	-	0	-	-	2	5	-	0	-	-	2	5	-
3	6	5	6	4,00	3	4	4,00	6	6	0,75	5	6	1,50	19	6	2,00
4	7	4	6	0,75	2	4,5	4,50	5	6	6,00	3	7	1,00	14	6	3,25
5	12	2	9	-	0	-	-	1	1	-	0	-	-	3	8	9,00
Axiais																
2 (VE)	4	0	-	-	0	-	-	2	4	-	0	-	-	2	4	-
3	6	5	6	0,00	3	6	0,00	6	6	0,00	5	6	0,00	19	6	0,00
4	8	4	8	0,00	2	8	0,00	5	8	0,00	3	8	0,00	14	8	0,00
5	10	2	10	-	0	-	-	1	10	-	0	-	-	3	10	0,00

^a Nesta análise, foram considerados apenas os trabalhos que empregam arranjos fatoriais completos sem réplica, dada a comparação com os valores sugeridos na literatura. ^b No caso dos pontos centrais, foram adotados os valores sugeridos pelo pacote comercial *Minitab - Versão 16*.

Fonte: Autoria própria (2018)

A Tabela 5.2 reforça essas conclusões em termos da mediana e do intervalo interquartil, revelando que todo componente de variação no número total de experimentos é proveniente da utilização de pontos centrais. De fato, ao se avaliar as publicações com três parâmetros de controle, constata-se mediana e intervalo interquartil de seis e dois pontos centrais, respectivamente. Da mesma forma, para quatro parâmetros, tem-se uma mediana igual a seis e um intervalo interquartil igual a 3,25 pontos centrais.

No caso desses pontos, porém, não há evidências suficientes para garantir que a maior parte dos trabalhos utiliza a quantidade de pontos centrais prescrita pelo *Minitab*, embora isso ocorra para pontos fatoriais e axiais. Dessa forma, rejeita-se a terceira hipótese levantada na seção 3 (H3). Ou seja, ao nível de 95% de confiança, demonstra-se que o percentual de publicações que preservam o número padrão de pontos centrais não é superior a 50%.

5.2.3 Variáveis de resposta e a presença de correlação

A partir dos 49 trabalhos analisados, foram obtidas 123 variáveis de resposta. Essas variáveis resultam de um enorme conjunto de características mensuráveis dos processos de manufatura. Em usinagem, por exemplo, foram encontradas rugosidade (HASHMI *et al.*, 2016), força de corte (MEDDOUR *et al.*, 2015), taxa de remoção de material (HOURMAND *et al.*, 2015), espessura do cavaco (DAOUD *et al.*, 2015), conicidade (RAJESH *et al.*, 2015), deflexão (SONAWANE e JOSHI, 2015), deformação máxima (SUNDARARAMAN *et al.* 2014), entre muitas outras.

Em soldagem, para citar apenas algumas variáveis de resposta, foram identificadas profundidade de penetração (KORRA *et al.*, 2015), tensão de ruptura (MOSTAAN *et al.*, 2016), microdureza (LOTFI e NOUROUZI, 2014), tamanho da região termicamente afetada (MOSTAFAPOUR *et al.*, 2017), resistência à tração (AHMADNIA *et al.*, 2016) e resistência ao impacto (SAFEEN *et al.*, 2016).

Nos demais processos, adicionalmente, percebeu-se uma diversidade ainda maior nas características mensuradas, envolvendo desde pressão em processos de hidroconformação (ZHANG e CONG, 2016) até eficiência de deposição na pulverização à plasma (PAKSERESHT *et al.*, 2015).

5.2.3.1 Variáveis de resposta

Para a avaliação da quarta hipótese levantada na seção 3 (H4), os trabalhos investigados foram classificados segundo a quantidade de variáveis de resposta. Em função das quantidades

mínima e máxima de variáveis, estabeleceram-se seis categorias, conforme demonstrado na Tabela 5.3. A partir dela, os trabalhos foram também estratificados por processos de manufatura, destacando-se aqueles com maior grau de ocorrência, a saber: usinagem e soldagem. Os demais processos foram agrupados em um único conjunto de dados e respondem por 12 dos 49 artigos estudados, como foi descrito na seção 5.1.

Nesse sentido, os testes de qualidade de ajuste Qui-Quadrado e os testes para proporções de variáveis de resposta em cada ategoria revelam-se como os principais resultados da Tabela 5.3. Na tentativa de se determinar a quantidade de variáveis mais utilizada, foram conduzidos quatro testes, identificados como “Teste 1”, que correspondem aos testes Qui-Quadrado.

Tabela 5.3 - Testes de hipóteses para o número de variáveis de resposta por tipo de processo de manufatura

Variáveis de Resposta	2014	2015	2016	2017	N	P	Total	
	N1	N2	N3	N4			Estat. ^a	p-value
Total								
Teste 1^b								
1	3	3	9	3	18	0,37	-	-
2	4	2	2	2	10	0,20	-	-
3	3	3	3	2	11	0,22	-	-
4	2	3	1	2	8	0,16	-	-
5	0	0	0	0	0	0,00	-	-
6	0	1	1	0	2	0,04	-	-
Total	12	12	16	9	49	1,00	26,061	0,000
Teste 2^c								
1	3	3	9	3	18	0,37	-	-
MVR (>1) ^d	9	9	7	6	31	0,63	-	-
Total	12	12	16	9	49	1,00	-	0,043
Usinagem								
Teste 1								
1	2	2	3	1	8	0,35	-	-
2	3	2	0	0	5	0,22	-	-
3	2	3	0	2	7	0,30	-	-
4	0	2	0	1	3	0,13	-	-
5	0	0	0	0	0	0,00	-	-
6'	0	0	0	0	0	0,00	-	-
Total	7	9	3	4	23	1,00	15,348	0,009
Teste 2								
1	2	2	3	1	8	0,16	-	-
MVR (>1)	5	7	0	3	15	0,65	-	-
Total	7	9	3	4	23	1,00	-	0,105

Tabela 5.3 – Testes de hipóteses para o número de variáveis de resposta por tipo de processo de manufatura (Continuação)

Variáveis de Resposta	2014	2015	2016	2017	N	Total		
	N1	N2	N3	N4		p	χ^2	p-value
Soldagem								
Teste 1								
1	0	0	3	1	4	0,29	-	-
2	1	0	0	2	3	0,21	-	-
3	0	0	2	0	2	0,14	-	-
4	2	0	0	1	3	0,21	-	-
5	0	0	0	0	0	0,00	-	-
6	0	1	1	0	2	0,14	-	-
Total	3	1	6	4	14	1,00	4,000	0,549
Teste 2								
1	0	0	3	1	4	0,29	-	-
MVR (>1)	3	1	3	3	10	0,71	-	-
Total	3	1	6	4	14	1,00	-	0,090
Outros Processos								
Teste 1								
1	1	1	3	1	6	0,50	-	-
2	0	0	2	0	2	0,17	-	-
3	1	0	1	0	2	0,17	-	-
4	0	1	1	0	2	0,17	-	-
5	0	0	0	0	0	0,00	-	-
6	0	0	0	0	0	0,00	-	-
Total	2	2	7	1	12	1,00	12,000	0,035
Teste 2								
1	0	0	3	1	4	0,50	-	-
MVR (>1)	3	1	3	3	10	0,50	-	-
Total	2	2	7	1	12	1,00	-	0,927

^a Estatística de teste: Teste 1 - χ^2 Teste 2 - Z ^b Testes de qualidade de ajuste Qui-Quadrado ^c Testes para uma proporção ^d Múltiplas Variáveis de Resposta

Fonte: Autoria própria (2018)

De igual modo, a fim de se verificar se a maior parte dos trabalhos emprega múltiplas respostas, foram realizados outros quatro testes, indicados pelas linhas de “Teste 2”, que respondem pelos testes para proporções. Ao todo, oito testes foram conduzidos, considerando-se os tipos de processos de fabricação e total de artigos analisados.

Pela aplicação do Teste 1 sobre o total de publicações, pode-se constatar, ao nível de 95% de confiança, que existe diferença significativa entre as quantidades de variáveis mensuradas nos trabalhos investigados. Isso é demonstrado pela obtenção de uma estatística de teste Qui-Quadrado de magnitude 26,061 e um *p-value* de 0,000. Em termos específicos, isso ocorre

devido aos processos de usinagem ($p\text{-value} = 0,009$) e outros processos de manufatura ($\chi^2 = 12,000$ e $p\text{-value} = 0,035$), nos quais as mesmas conclusões são observadas.

Em uma análise global, portanto, pode-se dizer que a categoria de artigos que mensuram apenas uma variável de resposta representa, individualmente, a ampla maioria dos trabalhos investigados. No entanto, em termos conjuntos, há preponderância significativa no uso de múltiplas variáveis de respostas para o total de publicações, conforme demonstrado pelo Teste 2. Em outras palavras, ao nível de 95%, há evidências suficientes para se inferir que a proporção de trabalhos que utiliza múltiplas respostas é superior a 50% do total de publicações.

Esse resultado confirma a quarta hipótese levantada na seção 3 (H4) e aponta na direção dos métodos e técnicas discutidos na seção 2.4. Ou seja, dado que a maior parte dos trabalhos emprega múltiplas respostas (63,27% em termos pontuais), esse estudo é um indicativo da relevância de técnicas e métodos multivariados para estudos da área de manufatura.

5.2.3.2 Modelos correlacionados

Na seção 5.2.3.1, o uso de múltiplas variáveis de resposta se mostrou como algo recorrente nos trabalhos investigados, confirmando uma das hipóteses levantadas na seção 3. Como mencionado, esse resultado ajuda a demonstrar a importância das técnicas multivariadas. No entanto, de forma isolada, pouco contrapõe a otimização multiobjetivo tradicional, na qual uma única função global é minimizada, na presença de restrições convenientes, como foi discutido na seção 2.4.

Nesse sentido, tendo em vista que essa função global pressupõe independência linear entre as funções originais, uma quinta hipótese foi interposta (H5), questionando a fração de modelos que apresentam correlação significativa. Ou seja, a fim de se testar a validade prática desse pressuposto, cada um dos 123 modelos expostos no preâmbulo da seção 5.2.3 foi analisado quanto à correlação com seus respectivos pares.

Para a presente análise, foram considerados todos os modelos apresentados pelos autores. Em alguns casos particulares, porém, foram estimados modelos próprios com base nos dados disponíveis. Isso ocorreu em virtude de inconsistências, como a supressão do princípio da hierarquia (MYERS e MONTGOMERY, 2009), conforme será detalhado na seção 5.2.4.1.

Como resultado, 128 pares foram avaliados, dos quais 92 revelaram correlação significativa. A partir disso, conduziu-se um teste para essa proporção. Com confiança de 95% e poder de 88,41%, então, constatou-se que, mais de 60% dos pares estão correlacionados,

atingindo, em termos específicos, 71,88% da amostra. A Figura 5.2 detalha essas conclusões e confirma a quinta hipótese levantada na seção 3 (H5).

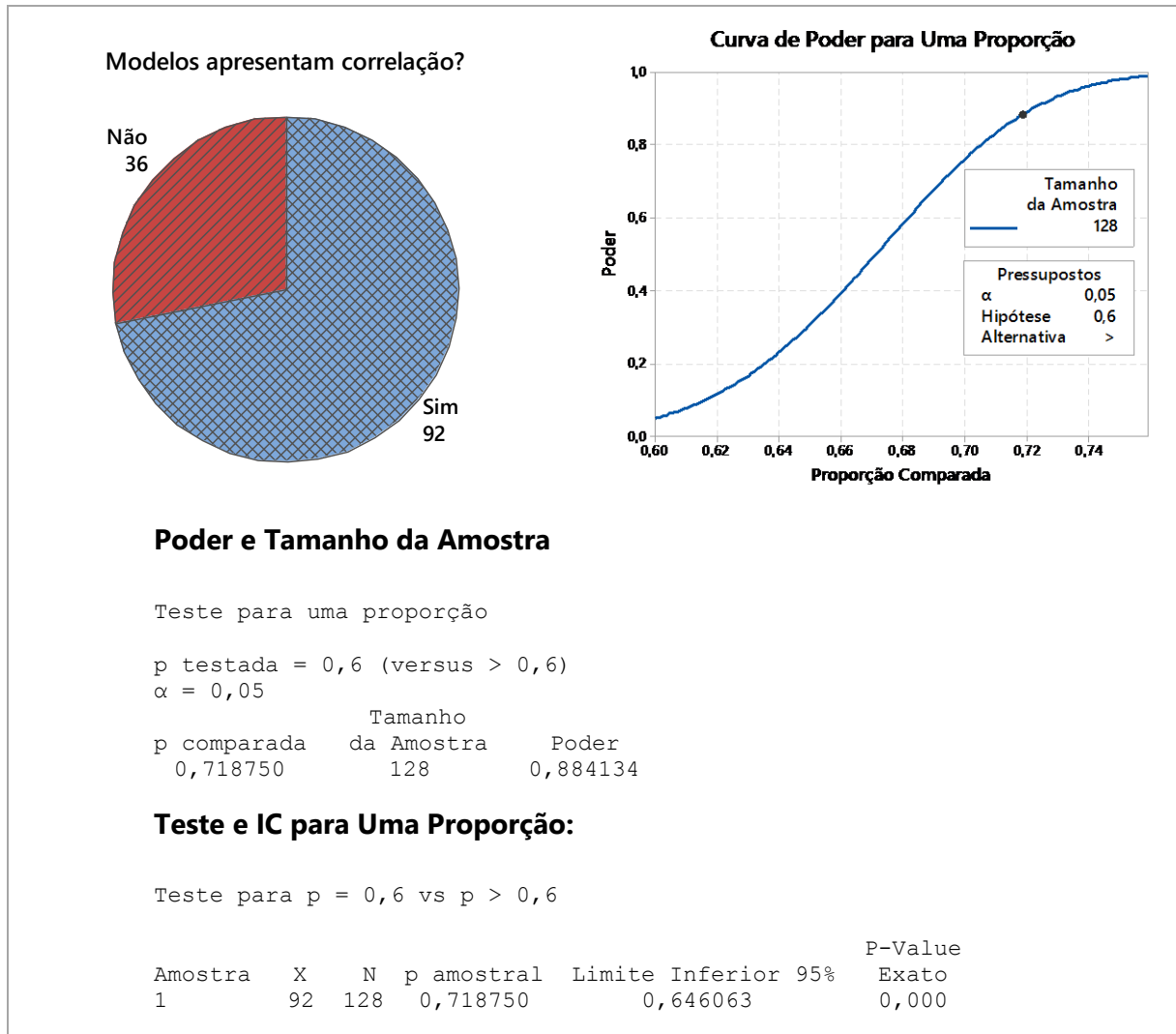


Figura 5.2 - Resultado do teste para a proporção de pares correlacionados

Fonte: Autoria própria (2018)

Nesse contexto, muitos exemplos podem ser citados, uma vez que a maior parte dos pares avaliados apresentou correlação. A Figura 5.3 exibe o resultado global dessa análise, indicando a magnitude da correlação entre os pares, por trabalho investigado. Adicionalmente, também ilustra o limite para a significância em cada um dos cenários.

Com esse procedimento, a resistência à tração revelou-se altamente correlacionada à dureza nos trabalhos de Ahmadnia *et al.* (2016) e Safeen *et al.* (2016), que estudaram o processo de soldagem por fricção de ligas de alumínio. Essa relação também foi obtida no trabalho de Pakseresht *et al.* (2015), que investigaram um processo de pulverização a plasma.

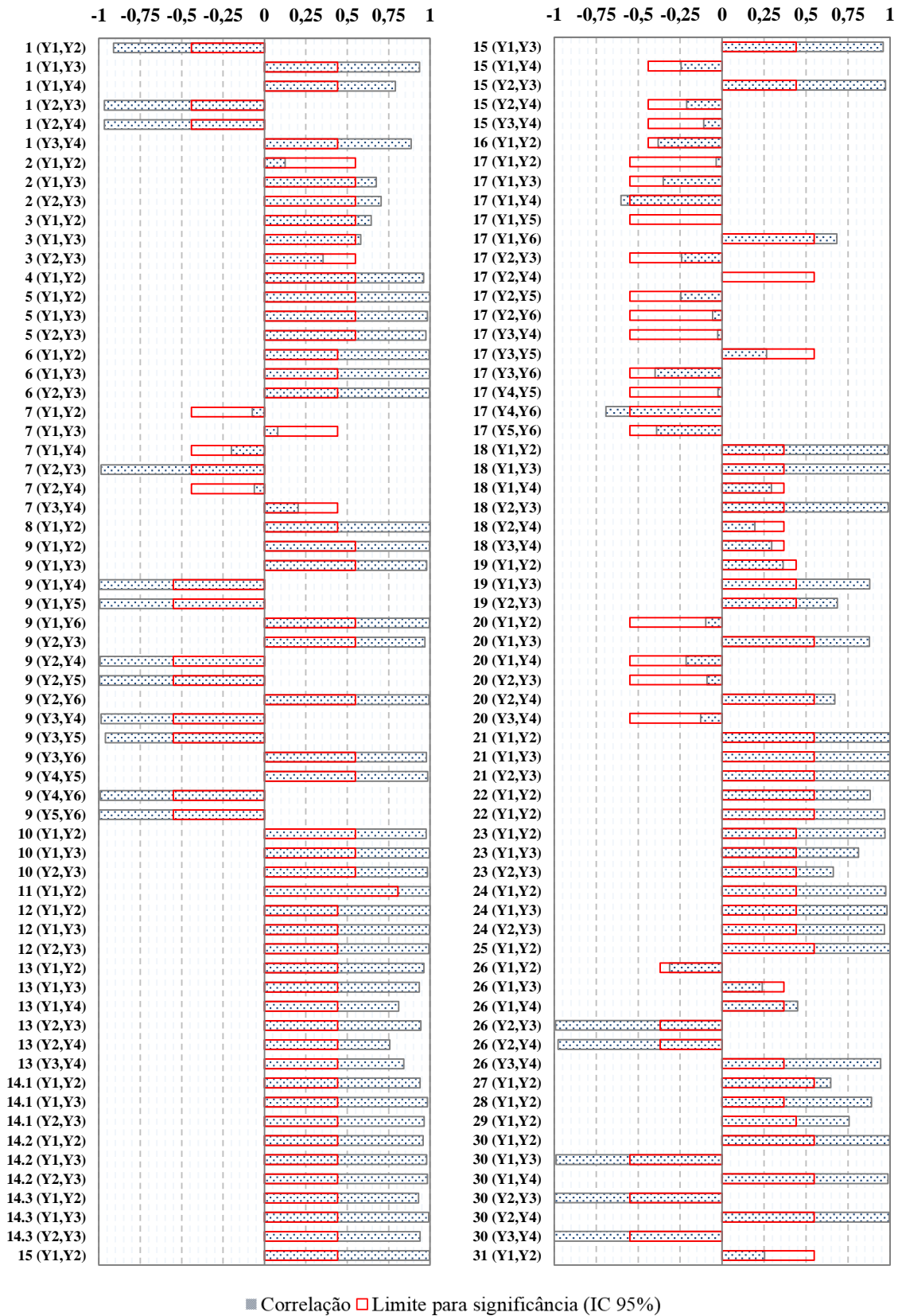


Figura 5.3 - Correlação observada entre modelos da área de manufatura

Fonte: Autoria própria (2018)

De modo análogo, a rugosidade em qualquer região de pequenas vigas apresentou correlação significativa com a deflexão, quando submetidas ao processo de furação conduzido por Sonawane e Joshi (2015). No trabalho de Amdouni *et al.* (2017), porém, a rugosidade média apresentou-se correlacionada à nanodureza, medida no processo de polimento por esferas de liga de alumínio (2017A-T451).

No processo de torneamento analisado por Daoud *et al.* (2015), a força de corte manifestou alta correção com a espessura do cavaco para três ligas de alumínio investigadas (Al2024-T3: $\rho = 0,985$; Al6061-T6: $\rho = 0,980$; Al7075-T6: $\rho = 0,992$). No estudo de Hosseinzadeh e Mouziraji (2016), porém, a força de corte não apresentou correlação com nenhum outro modelo do processo de produção de tubos de seção quadrada.

Um caso semelhante ocorreu entre os trabalhos de Yilmaz *et al.* (2014) e Hourmand *et al.* (2015). De um lado, o primeiro revelou alta correlação entre taxa de remoção de material (*MRR*) e razão de desgaste dos eletrodos (*EWR*), ao investigar um processo de furação de ligas aeroespaciais (D2NiBr). De outro, no entanto, o segundo mostrou correlação não significativa entre as mesmas respostas, ao estudar um processo de usinagem por descarga elétrica de um composto com matriz metálica de Al-Mg₂Si.

5.2.4 Curvatura, convexidade e sentido de otimização

Na seção 5.2.3, foram apresentadas conclusões acerca do número típico de variáveis de resposta para cada um dos processos de manufatura encontrados. Nesse sentido, a última seção destinou-se a uma análise mais ampla, com vistas a ratificar a importância das técnicas multivariadas e conferir subsídios para trabalhos futuros.

A presente seção, no entanto, visa explorar alguns dos pressupostos estatísticos da Metodologia de Superfície de Resposta – levantados nas seções 2.2 e 2.3. Com esse objetivo, 123 modelos foram investigados quanto à curvatura, à convexidade e ao sentido de otimização, formando uma base de 342 dados.

5.2.4.1 Regiões de Curvatura

Em alguns casos particulares, não foi possível determinar a existência de curvatura nas regiões experimentais. Isso ocorreu devido à utilização de apenas um ponto central (HOSSEINZADEH e MOUZIRAJI, 2016; HUANG *et al.*, 2016; MAJI *et al.*, 2016), à obtenção de respostas idênticas no centro do arranjo (COSTA *et al.*, 2016b; GUO *et al.*, 2014; SUNDARARAMAN *et al.*, 2014) ou à ocultação de dados em alguns dos trabalhos investigados

(LIU *et al.*, 2014b; YUE *et al.*, 2014). Assim, desconsiderando-se 16 respostas, foram calculados 107 modelos quanto a esse primeiro critério.

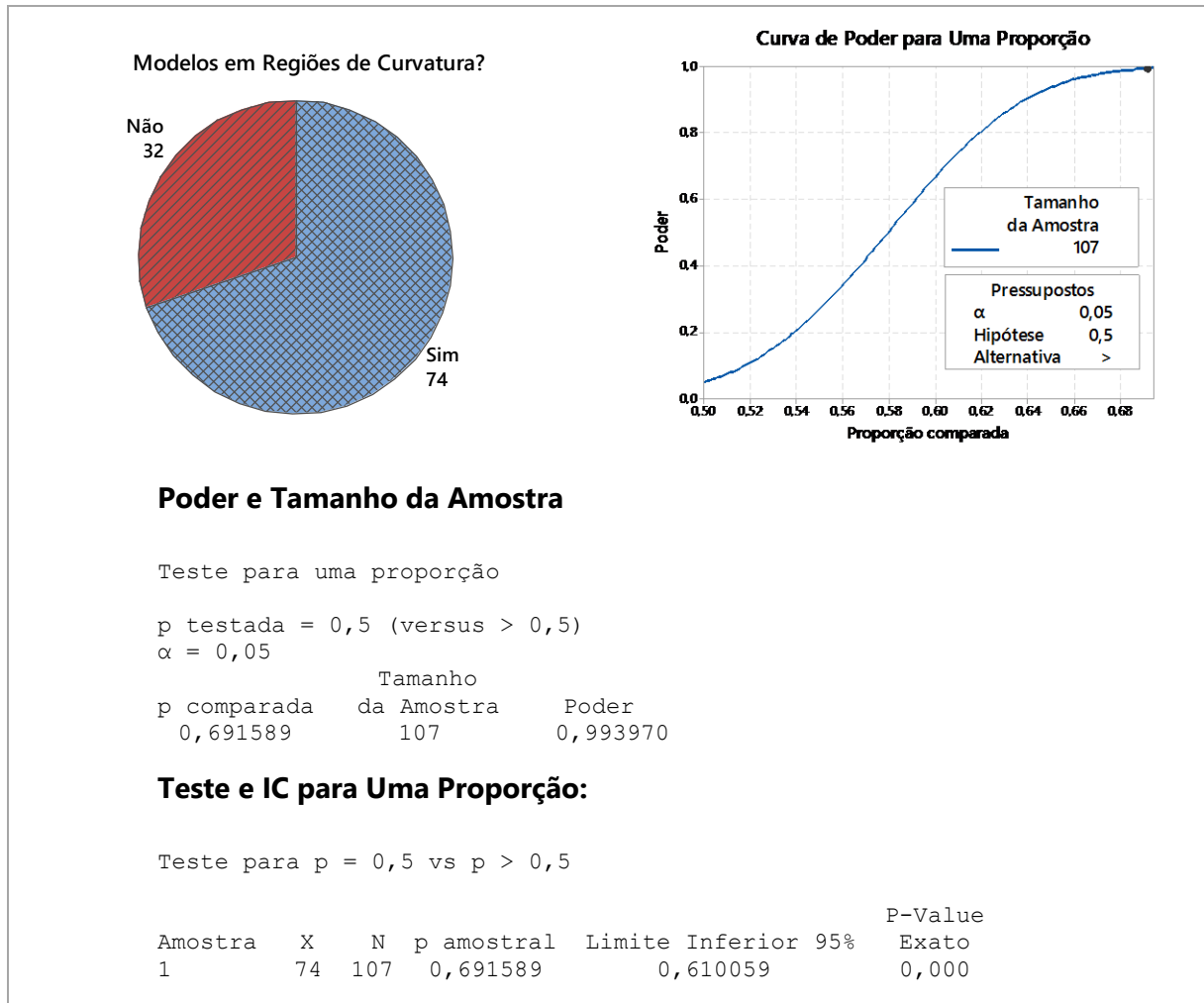


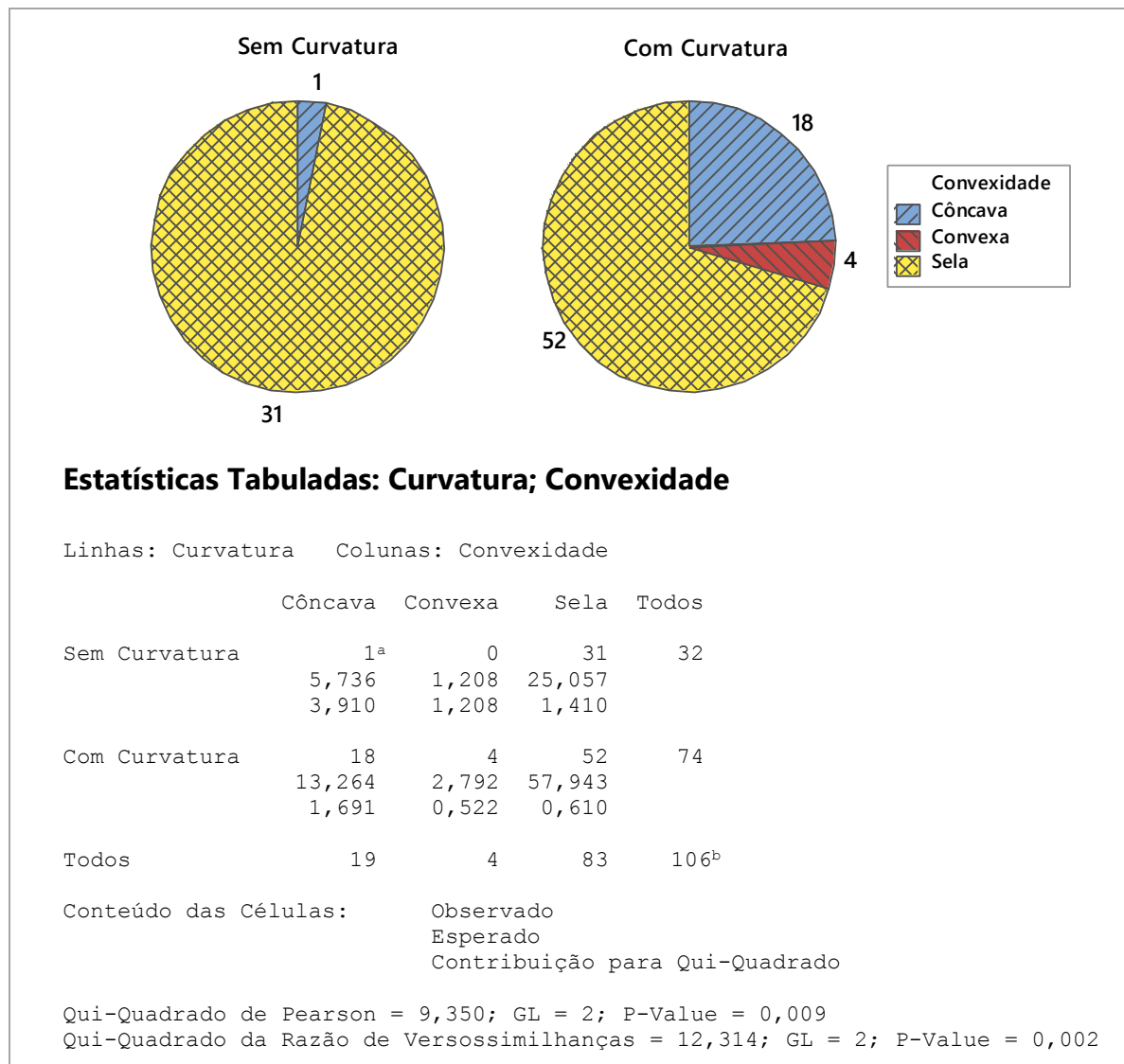
Figura 5.4 - Resultado do teste para a proporção de modelos em regiões de curvatura

Fonte: Autoria própria (2018)

Ao se realizar o teste para uma proporção, pode-se demonstrar, com confiança de 95% e poder de, aproximadamente, 99,40%, que mais de 50% dos modelos em manufatura são conduzidos em regiões de curvatura, representando, em termos de frequência, 69,16% da amostra. A Figura 5.4 apresenta esses resultados e permite uma análise mais detalhada das conclusões.

Muito embora essa demonstração comprove, estatisticamente, a sexta hipótese levantada na seção 3 (H6), o resultado obtido indica que ainda há uma grande parcela de modelos cujo ajuste não se dá em regiões de curvatura. Ou seja, pouco mais de 30% das funções são estimadas

em regiões planas, onde, segundo a literatura, os modelos de segunda ordem não são adequados (BOX e DRAPER, 2007; KHURI e CORNELL, 1996; MYERS e MONTGOMERY, 2009).



^a O modelo de Zhao *et al.* (2017) pertence a uma classe especial de concavidade que pode ser descrita pelo termo “cumeieira crescente”. ^b O modelo de rugosidade apresentado por Azam *et al.* (2015) foi excluído da análise de convexidade, uma vez que os autores ajustaram um modelo de primeira ordem.

Figura 5.5 - Resultado do teste para associação entre curvatura e convexidade

Fonte: Autoria própria (2018)

Investigando-se, em detalhes, essas funções, observa-se que quase a totalidade dos modelos ajustados em regiões sem curvatura apresenta formato de sela. Isto é, com exceção do trabalho de Zhao *et al.* (2017), que ajustou uma função côncava, 31 dos 32 modelos dessa categoria revelam um tipo de convexidade peculiar, cujos contornos não esboçam mínimos ou máximos globais.

Além disso, o próprio modelo de Zhao *et al.* (2017) pertence a uma classe especial de concavidade, que pode ser descrita pelo termo “cumeeira crescente” (ou, *rising ridge*; MYERS e MONTGOMERY, 2009). Ou seja, embora a função apresente um ponto de máximo, esta não se revela, em absoluto, como uma função côncava, segundo formalmente definido na seção 2.3. Suspeita-se, com isso, que o ajuste de modelos em regiões sem curvatura pressupõe a obtenção de algum tipo de distorção em segunda ordem, caracterizada, em geral, por selas.

A fim de se testar essa hipótese, foi realizado um cruzamento entre as categorias de curvatura e convexidade para os testes de Pearson e da Razão de Verossimilhanças, simultaneamente mostrados na Figura 5.5. Por ambos os tratamentos estatísticos, pode-se constatar a existência de associação significativa entre os critérios levantados.

De igual modo, ao se conduzir um teste para uma proporção, verificou-se, com poder de 95,59% e significância de apenas 5%, que a proporção de funções em formato de sela, de fato, corresponde a mais de 80% dos modelos estimados em regiões planas, o que confirma a sétima hipótese levantada na seção 3 (H7).

Essa conclusão demonstra compatibilidade com os princípios dispostos na literatura, uma vez que a não existência de curvatura pressupõe apenas duas alternativas. Em primeiro plano, indicam-se os métodos de identificação do ponto estacionário, como o Método do Vetor Gradiente (*steepest ascent method*), para a correta determinação da região “curva” (BOX e DRAPER, 2007). Em segundo, porém, orienta-se, no máximo, o ajuste de um modelo de primeira ordem (MYERS e MONTGOMERY, 2009) – como ocorreu no trabalho de Azam *et al.* (2015).

Assim, com base nas revelações obtidas a partir dos testes, bem como nos fundamentos teóricos suscitados, pode-se constatar que a presença de modelos em formato de sela deve-se, categoricamente, a uma distorção matemática, oriunda da não observância de uma etapa decisiva da Metodologia de Superfície de Resposta, a saber: a análise de curvatura. Esse fato fomenta um debate importante para estudos da área, haja vista que o ajuste de selas em regiões planas pode configurar prejuízo à etapa de otimização, induzindo a conclusões equivocadas.

5.2.4.2 Análise de Convexidade

No estudo de convexidade das funções, embora também tenham surgido problemas de caráter analítico, foi possível contorná-los, viabilizando uma investigação de 122 modelos. Dessa forma, apenas uma função foi excluída do estudo, uma vez que os autores ajustaram um modelo de primeira ordem (AZAM *et al.*, 2015), conforme mencionado na seção 5.2.4.1.

Não obstante, três trabalhos apresentaram modelos inconsistentes, ao removerem fatores principais, preservando suas interações ou termos quadráticos (CAI *et al.*, 2016; SAFEEN *et al.*, 2016; SONAWANE e JOSHI, 2015). Nesses casos, o princípio da hierarquia não foi respeitado, visto que, na ausência dos fatores principais, todos os termos associados deveriam ser igualmente removidos (MYERS e MONTGOMERY, 2009).

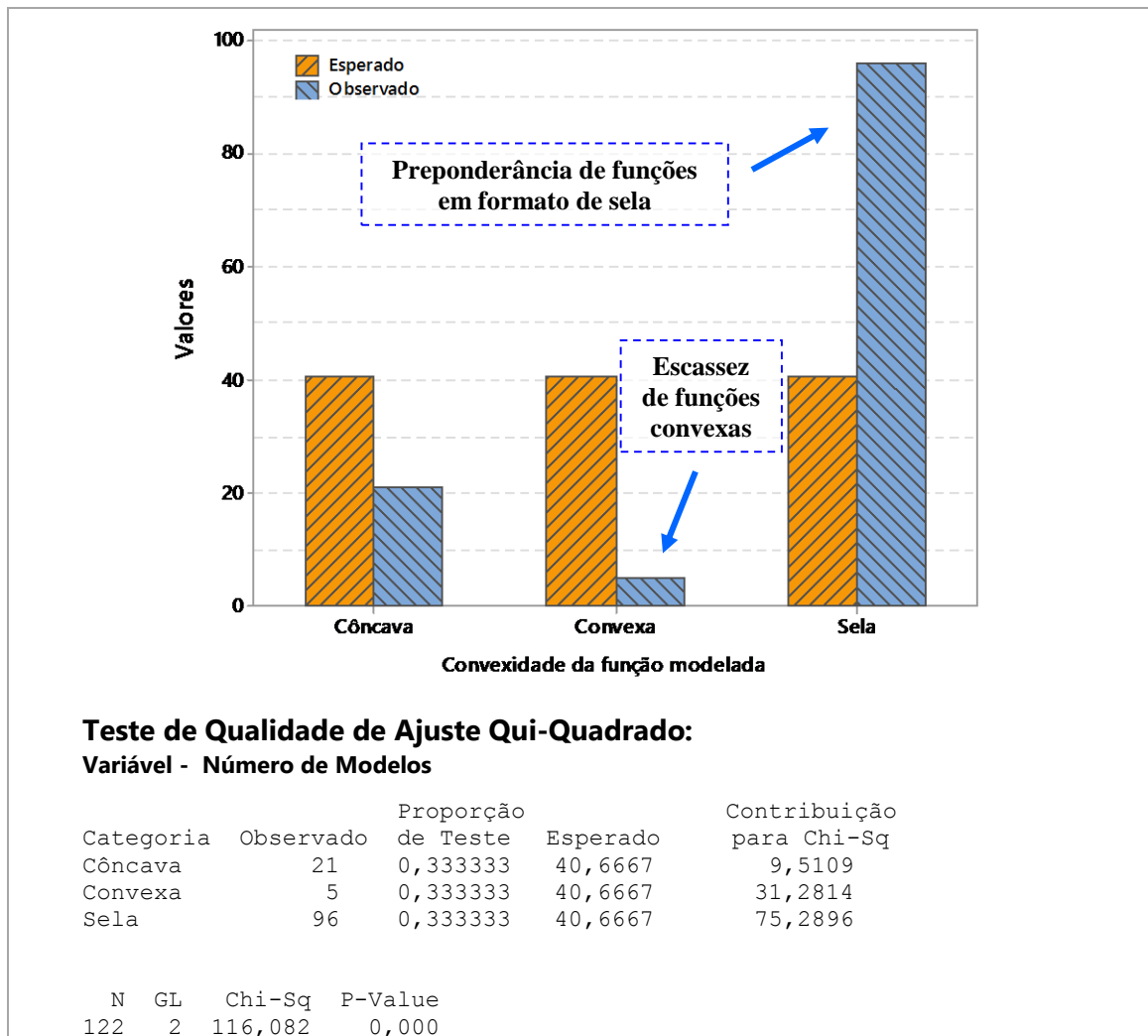


Figura 5.6 - Resultado do Teste Qui-Quadrado para o número de modelos em cada categoria de convexidade

Fonte: Autoria própria (2018)

Como solução, para esses trabalhos, foram adotados modelos quadráticos completos, a fim de permitir a correta avaliação de convexidade. Esse procedimento também foi adotado para os trabalhos de Ayyappan e Sivakumar (2014), Huang *et al.* (2016), Pakseresht *et al.* (2015) e Yilmaz *et al.* (2014), nos quais não foram fornecidos os modelos para as variáveis de

resposta. Assim, com base nos dados originais apresentados pelos autores, cada uma das respostas foi estimada utilizando-se do pacote comercial *Minitab* - v. 16.

Lotfi e Nourouzi (2014), nesse contexto, acrescentaram, atipicamente, interações entre fatores principais e termos quadráticos. Diante disso, foram adotados apenas os termos convencionais para a análise de convexidade, de maneira que não houvesse prejuízo para o presente estudo. Como resultado, ambos os modelos fornecidos se mostraram em formato de sela, confirmando, matematicamente, as ilustrações apresentadas pelos autores e demonstrando a validade do procedimento adotado.

De modo geral, portanto, pode-se constatar que uma parcela expressiva dos modelos avaliados exibe formato de sela. Em termos absolutos, isso representa 96 modelos do total de 122. Ao se conduzir um teste de ajuste Qui-Quadrado, demonstra-se, com confiança de 95%, que a proporção de modelos em formato de sela, de fato, supera as funções côncavas e convexas individualmente, conforme demonstrado na Figura 5.6. Opostamente, as funções convexas revelam grande escassez, contribuindo com apenas cinco modelos.

Ao se considerar, conjuntamente, o número de modelos côncavos e convexos, essa tese é novamente confirmada. Por meio do teste para uma proporção, prova-se, ao nível de 5% e poder unitário, que a ocorrência de funções em formato de sela supera 50% do total de modelos, atingindo, em termos relativos, 78% da amostra. A Figura 5.7 apresenta esses resultados e confirma, assim, a oitava hipótese levantada na seção 3 (H8).

Uma explicação plausível para a ocorrência expressiva de selas em manufatura foi apresentada na seção 5.2.4.1, ao se constatar que 31 das 83 funções¹⁵ nessa categoria foram obtidas na estimativa de regiões planas. No entanto, ainda assim, há notória preponderância de selas nas regiões com curvatura significativa.

Diante disso, o presente trabalho lançou mão de algumas justificativas prováveis para esse fato. Em primeiro lugar, levantou-se a hipótese de que alterações nos pontos axiais poderiam conduzir a distorções nos modelos estimados. Essa conjectura decorre do papel exercido por esses pontos nos arranjos CCD, visto que permitem estimativas mais adequadas para os coeficientes dos termos quadráticos, conforme foi descrito na seção 2.2.

A fim de se testar essa hipótese, os trabalhos foram investigados segundo a presença de rotacionalidade dos arranjos. Para isso, a análise de convexidade foi conduzida de forma a

¹⁵ Como explicado no início da seção 5.2.4.1, em 16 dos 123 modelos disponíveis, não foi possível avaliar a existência de curvatura, reduzindo o volume de modelos estudados quanto a esse critério.

distinguir os estudos que alteraram a distância padrão até os pontos axiais daqueles que a preservaram – segundo expresso pela Equação 2.3 da seção 2.2.

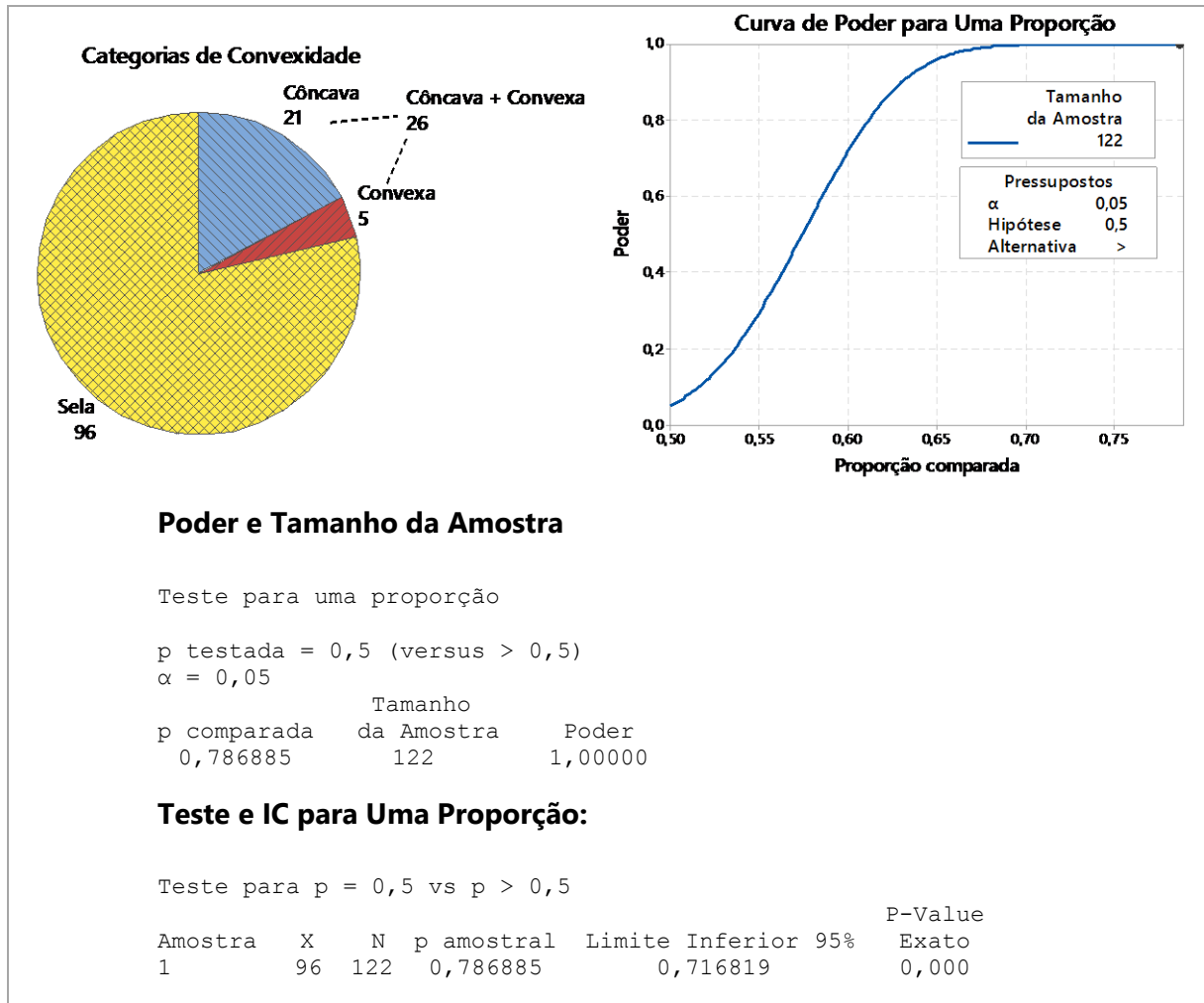


Figura 5.7 - Resultado do teste para a proporção de modelos em formato de sela

Fonte: Autoria própria (2018)

Por meio de um novo teste de associação, demonstra-se, ao nível de 5%, que não há evidências suficientes para supor uma relação entre convexidade e distâncias axiais (em quaisquer dos testes, obtém-se um p -value superior a 5% – Qui-Quadrado de Pearson: p -value = 0,205; Qui-Quadrado da Razão de Verossimilhanças: p -value = 0,195). Isto é, a ocorrência expressiva de selas nos modelos investigados não depende da rotacionalidade dos arranjos (Figura 5.8), o que refuta a nona hipótese levantada na seção 3 (H9).

De certa forma, essa constatação acaba por diminuir os impactos do uso de arranjos de face centrada ou de modificações seletivas nos pontos axiais, como foi encontrado no trabalho de Hassan *et al.* (2017), por exemplo. Sob outra perspectiva, porém, essa conclusão amplia os

horizontes de análise, fornecendo indicativos de que esse fato possa ter origem na exclusão de coeficientes em lugar de estimativas menos precisas, como inicialmente proposto.

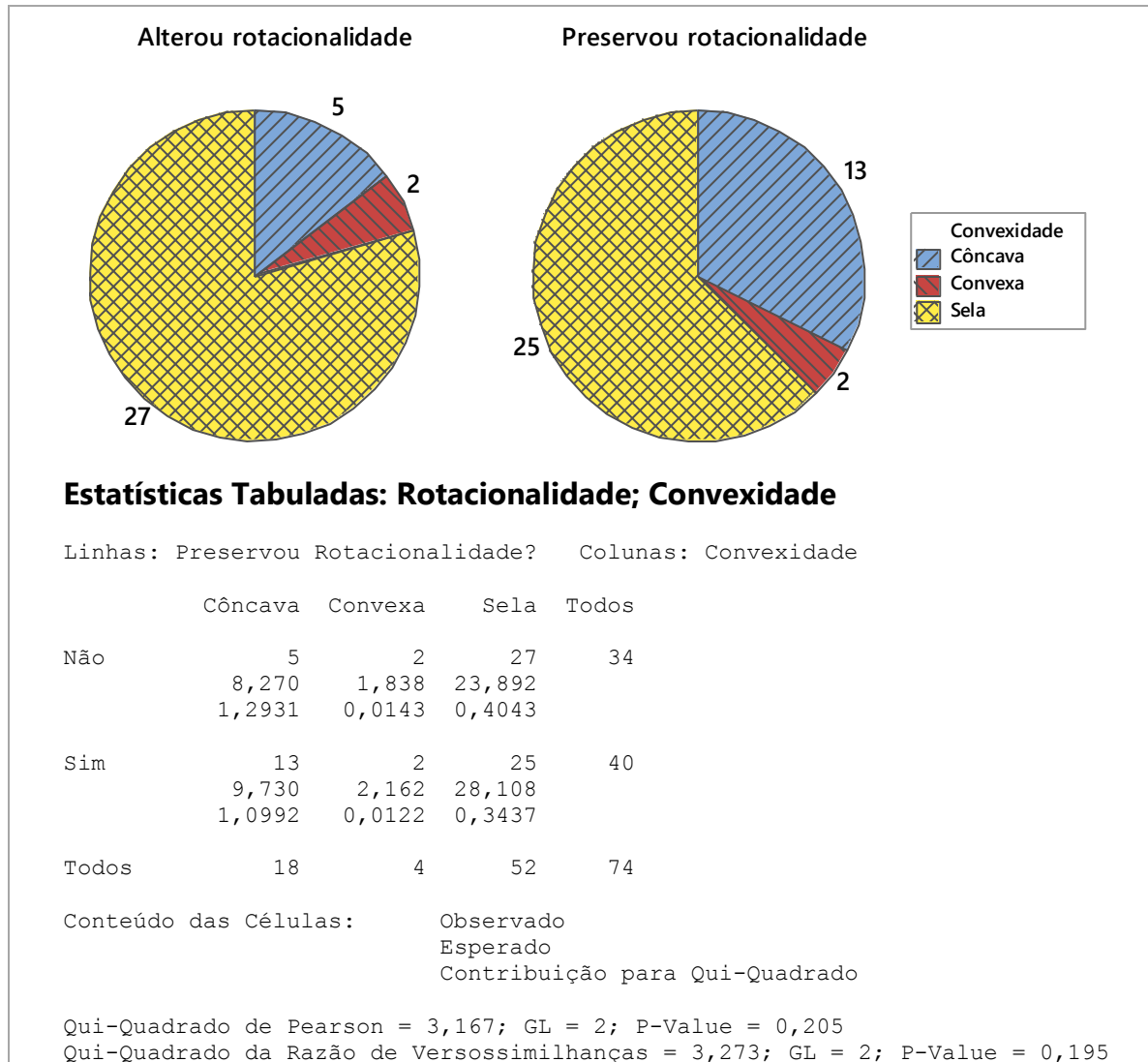


Figura 5.8 - Resultado do teste para associação entre rotacionalidade e convexidade

Fonte: Autoria própria (2018)

Apesar dessa hipótese, não foram encontradas evidências de que os termos utilizados nos modelos tenham real influência sobre a ocorrência de selas. Com confiança de 95%, assim, a hipótese nula não pode ser refutada, indicando a inexistência de associação significativa entre o uso de modelos reduzidos e a convexidade das funções observadas, segundo demonstrado nos cálculos da Figura 5.9.

De outro lado, porém, todas as 18 funções côncavas, encontradas em regiões com curvatura significativa, utilizaram-se de modelos quadráticos completos (com ou sem

interações). Dessa forma, embora não haja explicação para a ocorrência de selas segundo esse critério, parece haver alguma relação entre o ajuste de funções côncavas e o uso de modelos contendo todos os termos quadráticos.

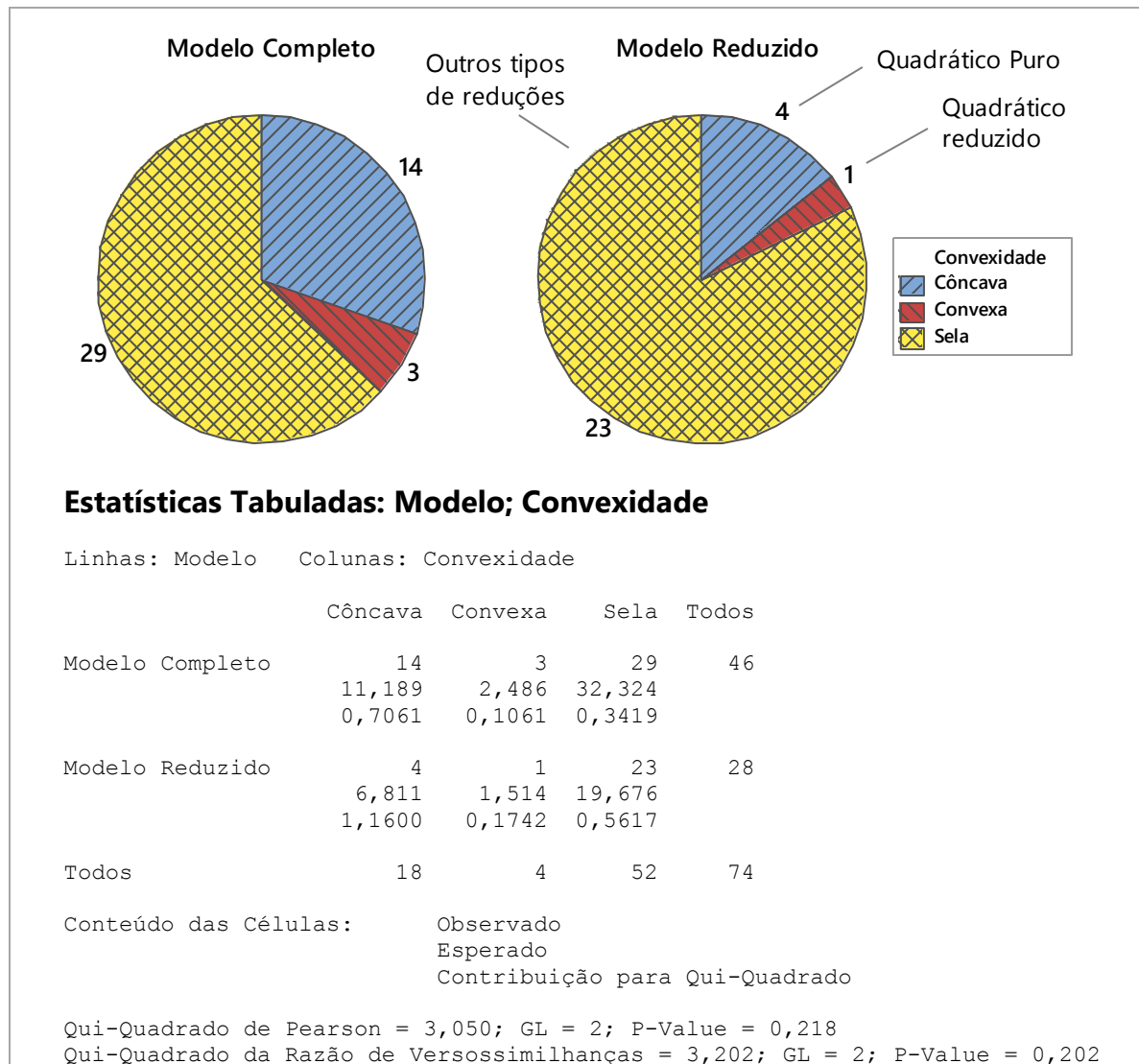


Figura 5.9 - Resultado do teste para associação entre tipo de modelo e convexidade

Fonte: Autoria própria (2018)

Além disso, em uma análise mais detalhada, 14 dos 18 modelos côncavos, foram obtidos ao se preservarem todos os termos. Assim, por meio de um teste da razão de verossimilhanças para a uma proporção, tem-se, ao nível de 5% e poder de 80,41%, que mais de 50% das funções côncavas provém de modelos quadráticos completos (Figura 5.10), o que ratifica a décima hipótese levantada na seção 3 (H10).

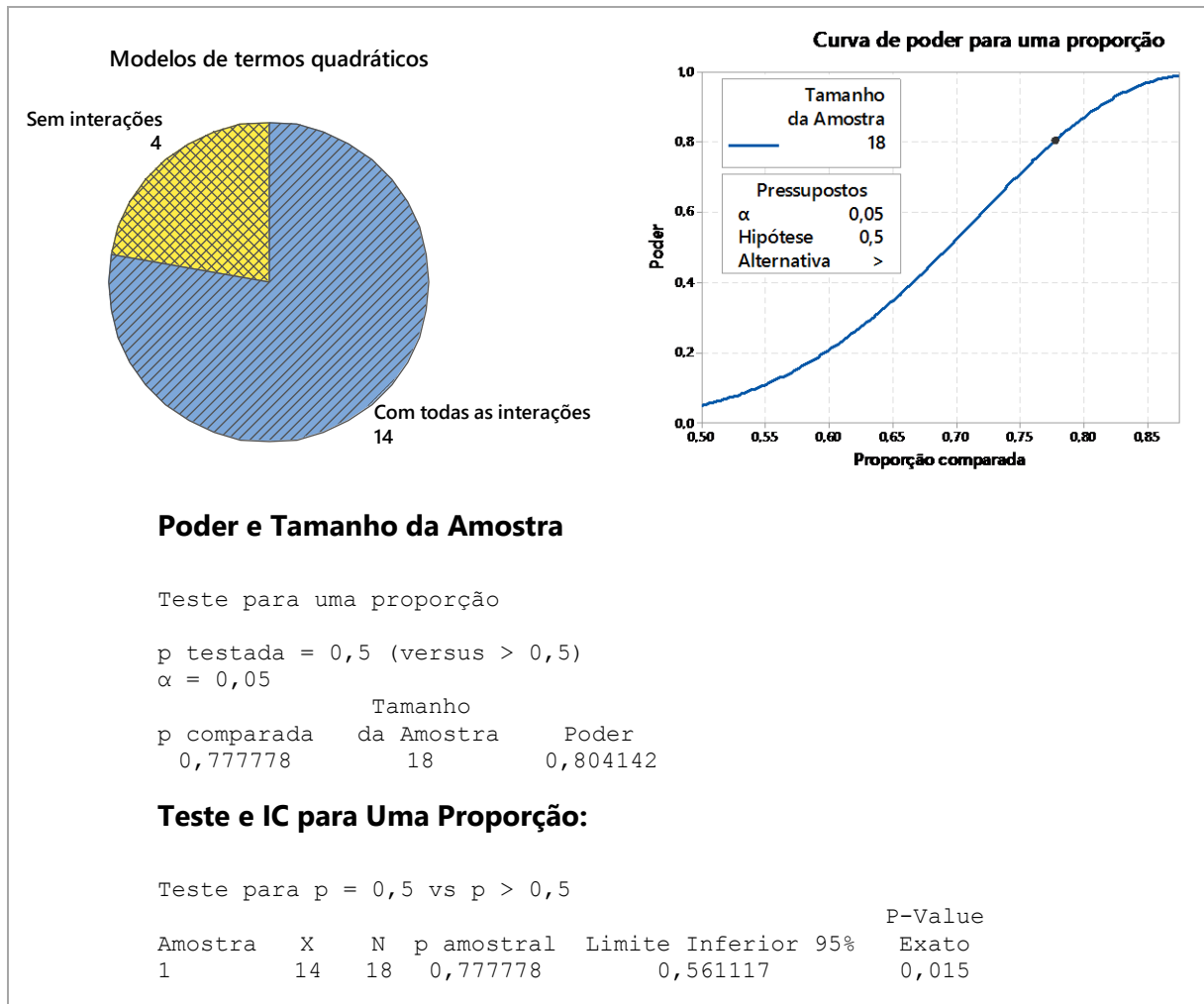


Figura 5.10 - Resultado do teste para a proporção de funções côncavas que resultam de modelos quadráticos completos

Fonte: Autoria própria (2018)

5.2.4.3 Sentido de Otimização

Nesta seção, são discutidas todas as análises envolvendo o sentido de otimização das funções investigadas. Para isso, cada um dos 123 modelos apresentados na seção 5.2.3 foi classificado segundo quatro categorias, a saber: minimização, maximização, alvo ou “não identificado”. Essa última classe refere-se aos trabalhos que não explicitaram claramente a convexidade, resultando em algumas exclusões¹⁶.

Em termos específicos, portanto, dez modelos foram desconsiderados (Araby *et al.*, 2017 – 01; Cai *et al.*, 2016 – 01; Huang *et al.*, 2016 – 02; Zhang *et al.* 2016 – 01; Zhang e Cong,

¹⁶ Em alguns casos, embora não tenha havido clareza, foi possível inferir sobre a maximização ou a minimização, dado o contexto das aplicações. Nos dez modelos mencionados, porém, optou-se pela exclusão, a fim de se evitar erros de classificação.

2016 – 02; Rajesh *et al.*, 2015 – 02; Xu *et al.*, 2014 – 01), restando 113 dados para a análise. A Figura 5.11 expõe uma visão geral dos modelos segundo o sentido de otimização utilizado e revela o pequeno número a que foram atribuídos valores-alvo.

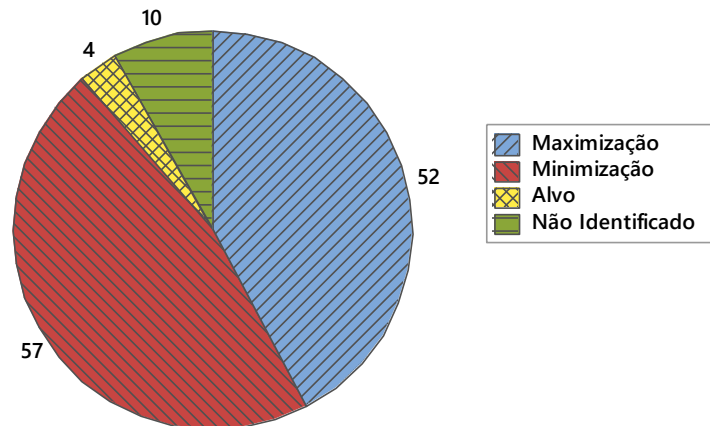


Figura 5.11 - Distribuição dos modelos estudados segundo o sentido de otimização

Fonte: Autoria própria (2018)

Nessas ocorrências, os autores não estabeleceram os sentidos clássicos de otimização, deixando de indicar minimização ou maximização e otimizando algumas funções em direção à valores específicos. Hashmi *et al.* (2016), por exemplo, fixou uma meta para a rugosidade, em vez de tentar minimizá-la, como a maior parte dos estudos avaliados (AZAM *et al.*, 2015; ZHOU *et al.*, 2016). De modo semelhante, Hassan *et al.* (2017) utilizaram esse critério para a fração volumétrica de fibras em estruturas de compósitos poliméricos de aeronaves.

Por meio de um teste de qualidade de ajuste Qui-Quadrado, pode-se demonstrar a identidade entre o número de modelos minimizados e maximizados. Em outras palavras, ao nível de 5%, não foi encontrada diferença significativa entre a quantidade modelos de maximização e minimização, conforme evidenciado pela Figura 5.12. Com isso, infere-se que, na área de manufatura, não há preponderância de um dos sentidos de otimização, o que confirma a décima primeira hipótese levantada na seção 3 (H11).

Em uma segunda análise, porém, o sentido de otimização proposto e a convexidade dos modelos observados foram avaliadas conjuntamente, resultando em um estudo de compatibilidade. Com base nas discussões apresentadas na seção 5.2.4.1, assim, foram considerados todos os modelos estimados, distinguindo-se, também, aqueles fora de regiões de curvatura. A Figura 5.13 ilustra a convexidade dos modelos estudados segundo o sentido de otimização.

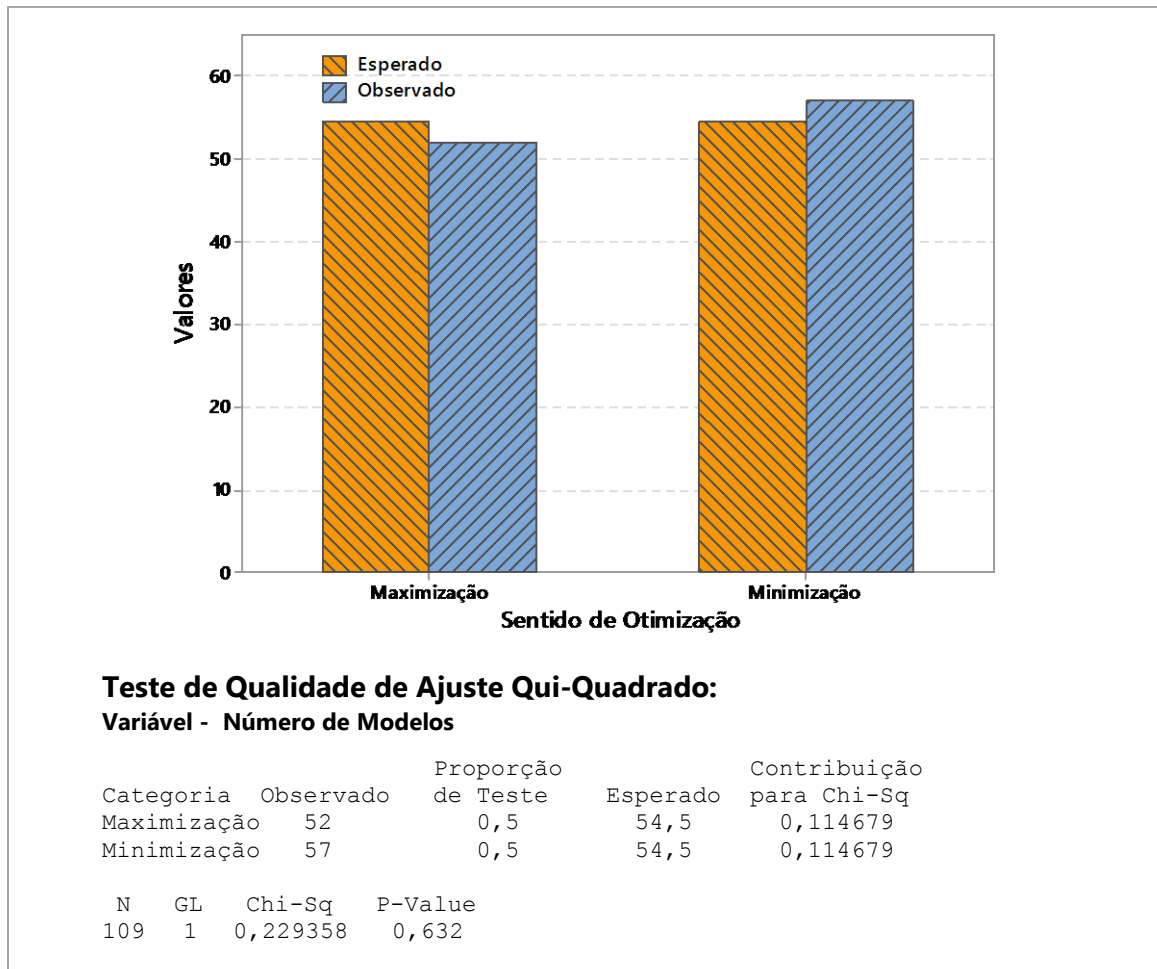


Figura 5.12 - Resultado do Teste Qui-Quadrado para o número de modelos nas principais categorias de otimização

Fonte: Autoria própria (2018)

Por meio dos gráficos da Figura 5.13, verifica-se que apenas 14 modelos apresentaram convexidade compatível com o sentido de otimização, de acordo com os critérios tratados na seção 2.3. Dessa forma, ao se considerar todas 113 funções classificadas, garante-se, com poder de 97,17% e confiança de 95%, que mais de 75% dos modelos em manufatura não são compatíveis com a direção de otimização desejada, atingindo, em termos relativos, 87,61% da amostra e refutando, assim, a décima segunda hipótese levantada na seção 3 (H12).

Além disso, ao se investigar o número de trabalhos que emprega a restrição do espaço experimental proposta na literatura (DEL CASTILHO, 2007; HOERL, 1985), observa-se que apenas um dos artigos deixa clara sua utilização (COSTA *et al.*, 2016b), embora um grande número de estudos tenha aplicado outros tipos de restrições, como as necessárias ao método *Desirability* (AHMADNIA *et al.*, 2016; HOSSEINZADEH e MOUZIRAJI, 2016).

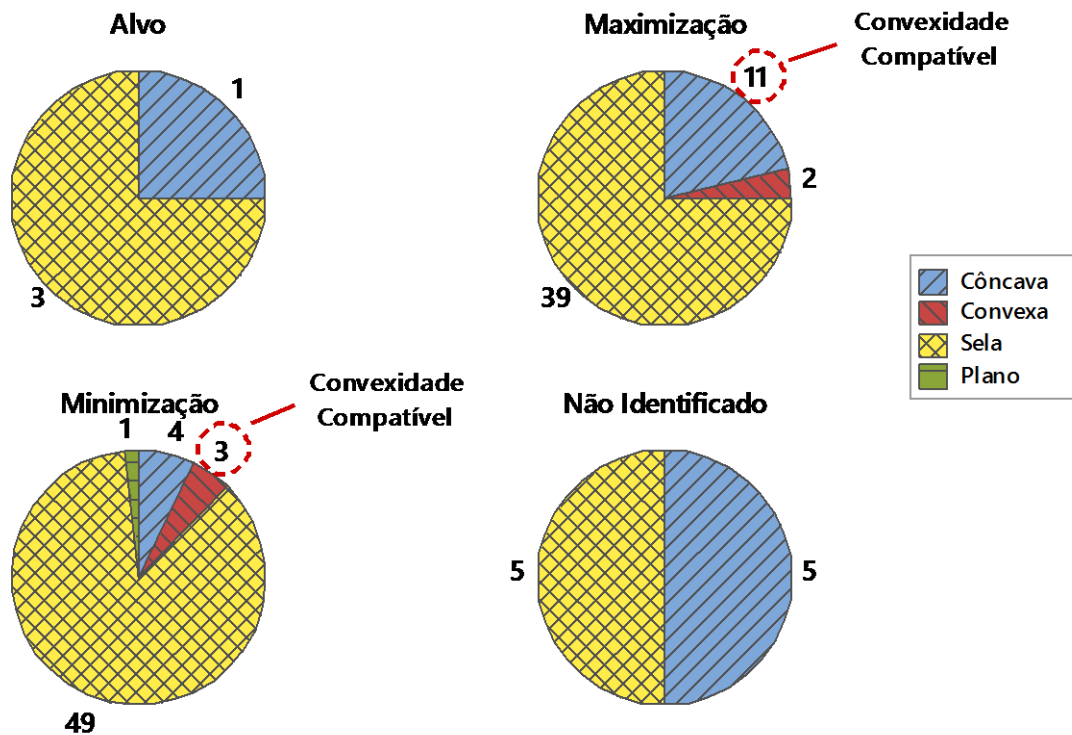


Figura 5.13 - Convexidade dos modelos estudados segundo o sentido de otimização

Fonte: Autoria própria (2018)

Essa constatação refuta a décima terceira hipótese (H13) e traz subsídios para uma importante discussão, iniciada na seção 2.3. Isto é, uma vez que grande parte dos modelos não apresenta compatibilidade entre convexidade e sentido de otimização e, aliado a isso, a maior parte dos trabalhos não se utiliza de restrição do espaço experimental, é provável que haja equívocos nas conclusões obtidas com a MSR. Adicionalmente, como a maioria das funções possui formato de sela, pode-se dizer que, em quase a totalidade dos casos, haverá problemas de compatibilidade.

Assim, com base nos fatos demonstrados nesta seção, o presente trabalho sugere a inclusão obrigatória da restrição do espaço experimental como parte da Metodologia de Superfície de Resposta, segundo expresso pela Equação 2.6 da seção 2.3. Essa recomendação visa evitar os problemas estatísticos apresentados por Del Castilho (2007), Hoerl (1985) e outros, considerando a realidade das aplicações.

5.3 Caso revisitado em manufatura avançada

Considerando os preceitos debatidos ao longo do presente trabalho, esta seção apresenta um caso prático da Metodologia de Superfície de Resposta em manufatura avançada. Utilizando-se de dados disponíveis em uma das aplicações da seção 5.1, a MSR foi conduzida segundo o roteiro da Figura 2.1 da Seção 2.1 – Abordagem clássica e direcionamentos práticos.

Além disso, em cada uma das etapas, foram discutidos os aspectos críticos suscitados na seção 2, sob um enfoque teórico, e investigados na seção 5, sob uma análise empírica. A seção 5.3.1, assim, é resultado de um caso revisitado de usinagem ultrassônica de materiais cerâmicos.

5.3.1 Usinagem ultrassônica de materiais cerâmicos

Dentre os 49 artigos investigados no presente trabalho, o estudo de Liu *et al.* (2014a) se destacou como um dos que mais observaram as etapas da Metodologia de Superfície de Resposta, embora tenham realizado algumas simplificações. Nessa pesquisa, Liu *et al.* (2014a) investigaram o processo de usinagem ultrassônica de materiais cerâmicos que, nesta seção, passa a ser analisado conforme a sequência de etapas da Figura 2.1.

a) **Passo 1:** *Definição dos parâmetros de controle ou fatores influentes sobre o processo*

Como apresentado na seção 2.1, a seleção dos parâmetros de controle de um determinado processo pode ser realizada por meio de uma revisão de literatura adequada. Nesses casos, a investigação teórica deve remontar exatamente ao processo estudado. No estudo em questão, Liu *et al.* (2014a) organizaram informações de diferentes fontes, na tentativa de definir as principais variáveis de controle e os respectivos níveis.

A Tabela 5.4 apresenta os níveis de cada parâmetro selecionado pelos autores. Por meio dela, pode-se observar que, nos pontos fatoriais, o avanço varia de 7 a 13 $\mu\text{m/s}$, a potência ultrassônica de 25 a 75% e a rotação de 1000 a 2000 rpm. Os pontos centrais, por sua vez, correspondem aos pontos médios dos níveis +1 e -1 de cada parâmetro de controle, indicando um avanço de 10 $\mu\text{m/s}$, uma potência ultrassônica de 50% e uma rotação de 1500 rpm.

Os pontos axiais são colocados a uma distância de 1,682, obtida a partir da Equação 2.3 com $k = 3$. Em termos reais, isso é representado, nos sentidos de menor e maior níveis, por avanços de 5 e 15 $\mu\text{m/s}$, potências ultrassônicas de 8 e 92% e rotações de 660 e 2.340 rpm, respectivamente.

Tabela 5.4 - Níveis dos parâmetros selecionados

Nível Codificado	Parâmetros		
	Avanço	Potência Ultrassônica	Rotação
	f	p	r
	($\mu\text{m/s}$)	(%)	(rpm)
1,682	15	92	2.340
1,000	13	75	2.000
0,000	10	50	1.500
-1,000	7	25	1.000
-1,682	5	8	660

Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2014a)

b) **Passo 2:** *Avaliação dos fatores de maior influência sobre as respostas analisadas*

Em alguns casos, quando não há certeza sobre a real influência dos parâmetros sugeridos no Passo 1, é necessário decidir entre aqueles fatores que, de fato, governam o processo investigado. Na seção 2.1, foram discutidas algumas formas típicas de se realizar esse tipo de análise, como, por exemplo, a aplicação de arranjos fatoriais fracionados ou de arranjos de Taguchi (L_8 , L_{12} , etc.).

No presente trabalho, muitos foram os artigos que se utilizaram de estratégias dessa natureza. No entanto, na maioria dos casos, isso foi realizado em resposta a levantamentos com mais de cinco parâmetros de controle no Passo 1. Assim, como o estudo de Liu *et al.* (2014a) utilizou-se de apenas três fatores, esse tipo de análise não foi desenvolvida.

De fato, como demonstrado na seção 5.2.1, a maior parte dos processos de manufatura são controlados por três ou quatro variáveis de entrada.

c) **Passo 3:** *Planejamento do experimento segundo um arranjo fatorial com pontos centrais*

Conforme discutido ao longo da seção 2.2, os pontos fatoriais permitem ao experimentador identificar as contribuições dos parâmetros de controle sobre as respostas investigadas. Os pontos centrais, por sua vez, têm a finalidade de possibilitar a correta localização das regiões de curvatura.

Nesse sentido, em uma abordagem sequencial, os pontos fatoriais e centrais compõem as primeiras corridas a serem apreciadas pela Metodologia de Superfície de Resposta. A Tabela 5.5 apresenta o arranjo formado por esses pontos, com base nos dados de Liu *et al.* (2014a), em unidades codificadas (valores padronizados) e decodificadas (valores reais).

Tabela 5.5 - Arranjo fatorial com pontos centrais para o processo de usinagem ultrassônica investigado

Nº	Níveis dos parâmetros					
	Avanço		Potência Ultrassônica		Rotação	
	F		p		r	
	(µm/s)		(%)		(rpm)	
	Cod.	Decod.	Cod.	Decod.	Cod.	Decod.
Pontos fatoriais						
1	-1,00	7	-1,00	25	-1,00	1000
2	1,00	13	-1,00	25	-1,00	1000
3	-1,00	7	1,00	75	-1,00	1000
4	1,00	13	1,00	75	-1,00	1000
5	-1,00	7	-1,00	25	1,00	2000
6	1,00	13	-1,00	25	1,00	2000
7	-1,00	7	1,00	75	1,00	2000
8	1,00	13	1,00	75	1,00	2000
Pontos centrais						
9	0,00	10	0,00	50	0,00	1500
10	0,00	10	0,00	50	0,00	1500
11	0,00	10	0,00	50	0,00	1500

Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2014a)

d) **Passo 4:** *Condução dos ensaios e mensuração das respostas de interesse (coleta de dados)*

Após a estruturação do arranjo experimental, os ensaios devem ser conduzidos visando a medição de características críticas para o processo, como foi comentado na seção 2.4.1. Na seção 5.2.3, muitas dessas características foram citadas como exemplos de variáveis típicas dos processos de manufatura. No trabalho de Liu *et al.* (2014a), contudo, foram mensurados o Desgaste da Ferramenta (µm) e o Cavaco de Saída (µm), por se tratarem de respostas de interesse para o processo de usinagem ultrassônica investigado.

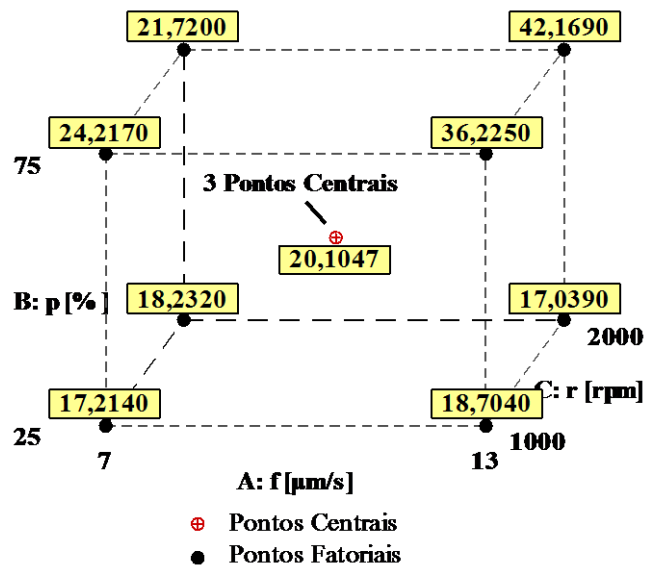
Tabela 5.6 - Mensuração das respostas de interesse em processo de usinagem ultrassônica a partir de um arranjo fatorial com pontos centrais

Nº	Níveis dos parâmetros						Respostas	
	Avanço		Potência Ultrassônica		Rotação		Desgaste da Ferramenta	Cavaco de saída
	f		P		r		Tw	Ec
	(µm/s)		(%)		(rpm)		(µm)	(µm)
	Cod.	Decod.	Cod.	Decod.	Cod.	Decod.	-	-
Pontos fatoriais								
1	-1,00	7	-1,00	25	-1,00	1000	17,214	67,000
2	1,00	13	-1,00	25	-1,00	1000	18,704	59,670
3	-1,00	7	1,00	75	-1,00	1000	24,217	137,000
4	1,00	13	1,00	75	-1,00	1000	36,225	56,330
5	-1,00	7	-1,00	25	1,00	2000	18,232	40,330
6	1,00	13	-1,00	25	1,00	2000	17,039	53,670
7	-1,00	7	1,00	75	1,00	2000	21,720	49,000
8	1,00	13	1,00	75	1,00	2000	42,169	40,670
Pontos centrais								
9	0,00	10	0,00	50	0,00	1500	19,315	36,670
10	0,00	10	0,00	50	0,00	1500	20,517	34,000
11	0,00	10	0,00	50	0,00	1500	20,482	35,670

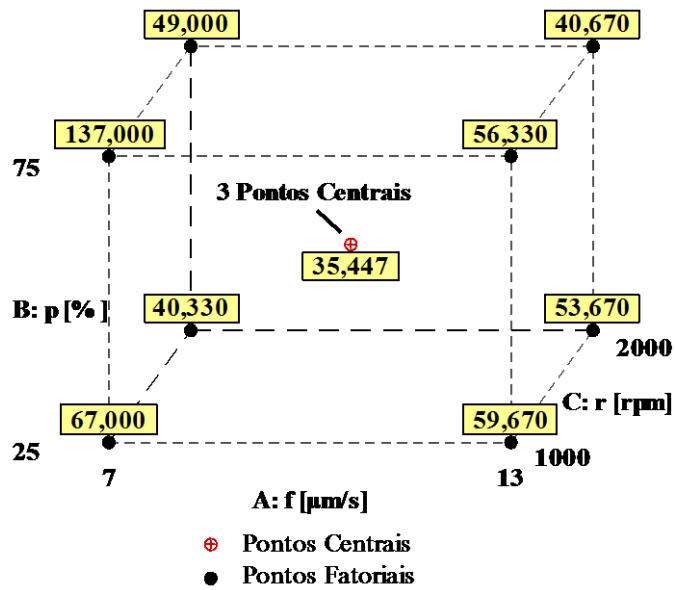
Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2014a)

A Tabela 5.6 apresenta o arranjo fatorial com pontos centrais, disposto na Tabela 5.5, contendo as respostas de interesse medidas em cada ensaio. Em termos práticos, isso significa, por exemplo, que, ao se realizar um primeiro experimento com avanço de 7 µm, potência ultrassônica de 25% e rotação de 1000 rpm, foram produzidos um desgaste nas interfaces da ferramenta de 17,214 µm e um cavaco de saída com comprimento de 67,000 µm.

A Figura 5.14 ilustra o arranjo experimental da Tabela 5.6 por meio de uma representação geométrica das respostas medidas para as diferentes combinações de avanço (f), potência ultrassônica (p) e rotação (r). Ao centro de cada cubo, são indicadas as quantidades de pontos centrais utilizadas, bem como a média das respostas obtidas nesses pontos (20,1047 µm para o Desgaste da Ferramenta e 35,447 µm para o Cavaco de Saída).



(a) Y1: Desgaste da Ferramenta



(b) Y2: Cavaco de Saída

Figura 5.14 - Representações geométricas do arranjo fatorial com pontos centrais para as variáveis de respostas medidas no processo investigado

Fonte: Autoria própria (2018)

e) **Passo 5:** Avaliação da existência de curvatura na região experimental

Como tratado na seção 2.2, a existência de curvatura nas regiões experimentais constitui-se de um dos pressupostos básicos para a Metodologia de Superfície de Resposta. Apesar disso,

nenhum dos trabalhos investigados no presente estudo apontou a condução de testes de curvatura como parte de seu escopo de análise.

Liu *et al.* (2014a), embora não tenham tratado dessa etapa, realizaram a modelagem de suas funções em regiões de curvatura, conforme demonstrado pelas análises de variância das Figuras 5.15 (Desgaste da Ferramenta) e 5.16 (Cavaco de Saída). Com confiança de 95%, como o *p-value*, em ambos os casos, é inferior a 5%, pode-se garantir que as regiões experimentais investigadas de Desgaste da Ferramenta (Y1) e de Cavaco de Saída (Y2) apresentam curvatura significativa.

Análise de Variância para o Desgaste da Ferramenta (unidades codificadas)

Fonte	GL	SQ Seq	SQ Aj	QM Aj	F	P
Efeitos Principais	3	488,092	488,092	162,697	347,65	0,003
A:f	1	134,103	134,103	134,103	286,55	0,003
B:p	1	353,009	353,009	353,009	754,31	0,001
C:r	1	0,980	0,980	0,980	2,09	0,285
Interações Duplas	3	135,523	135,523	45,174	96,53	0,010
A*B:f*p	1	129,283	129,283	129,283	276,25	0,004
A*C:f*r	1	4,144	4,144	4,144	8,86	0,097
B*C:p*r	1	2,095	2,095	2,095	4,48	0,169
Interações Triplas	1	15,468	15,468	15,468	33,05	0,029
A*B*C:f*p*r	1	15,468	15,468	15,468	33,05	0,029
Curvatura	1	41,008	41,008	41,008	87,63	0,011
Erro Residual	2	0,936	0,936	0,468		
Erro Puro	2	0,936	0,936	0,468		
Total	10	681,026				

Figura 5.15 - Análise de Variância para o Desgaste da Ferramenta (μm)

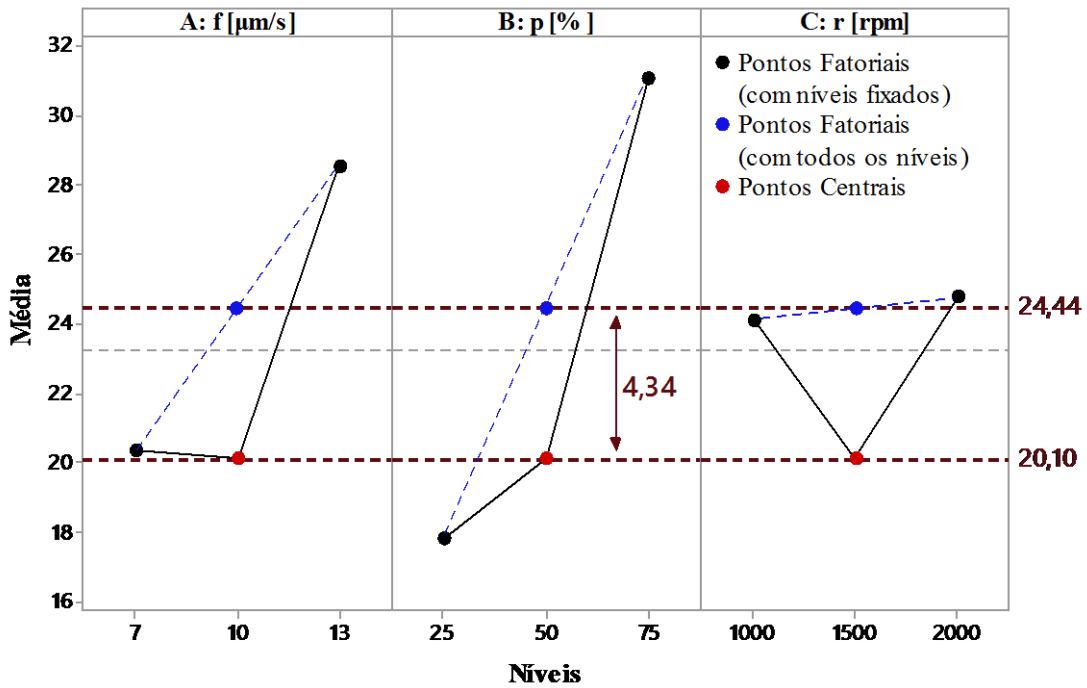
Fonte: Autoria própria (2018)

Análise de Variância para o Cavaco (unidades codificadas)

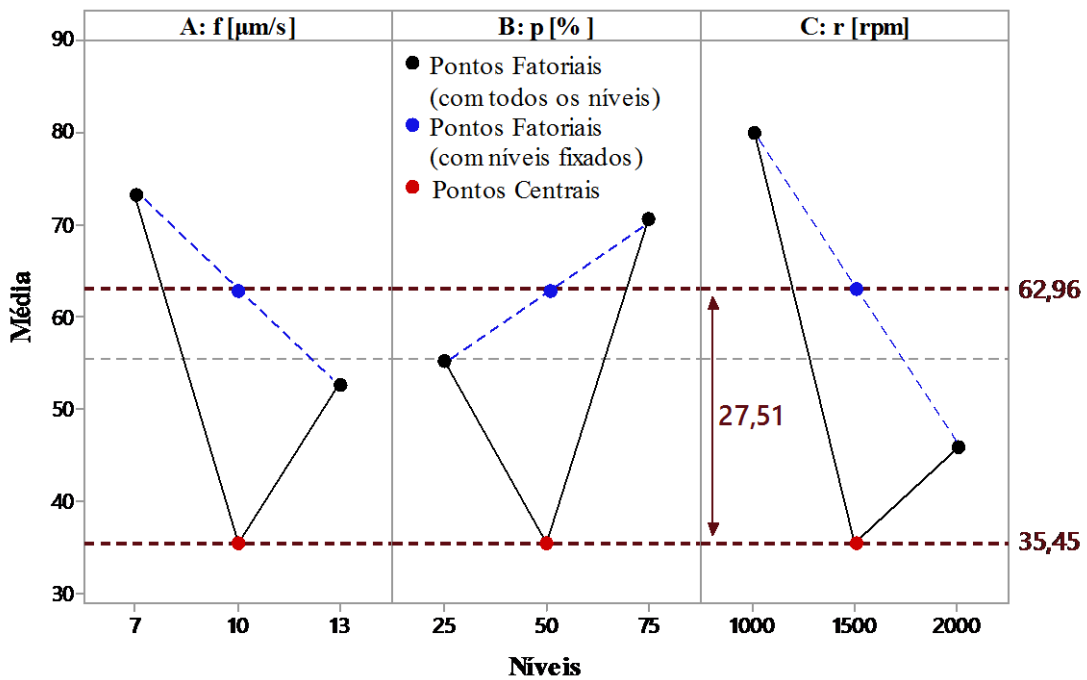
Fonte	GL	SQ Seq	SQ Aj	QM Aj	F	P
Efeitos Principais	3	3669,78	3669,78	1223,26	672,26	0,001
A:f	1	860,92	860,92	860,92	473,13	0,002
B:p	1	485,63	485,63	485,63	266,88	0,004
C:r	1	2323,23	2323,23	2323,23	1276,76	0,001
Interações Duplas	3	2839,67	2839,67	946,56	520,19	0,002
A*B:f*p	1	1128,36	1128,36	1128,36	620,10	0,002
A*C:f*r	1	1081,36	1081,36	1081,36	594,27	0,002
B*C:p*r	1	629,95	629,95	629,95	346,19	0,003
Interações Triplas	1	333,72	333,72	333,72	183,40	0,005
A*B*C:f*p*r	1	333,72	333,72	333,72	183,40	0,005
Curvatura	1	1651,45	1651,45	1651,45	907,57	0,001
Erro Residual	2	3,64	3,64	1,82		
Erro Puro	2	3,64	3,64	1,82		
Total	10	8498,26				

Figura 5.16 - Análise de Variância para o Cavaco de Saída (μm)

Fonte: Autoria própria (2018)



(b) Y1: Desgaste da Ferramenta



(b) Y2: Cavaco de Saída

Figura 5.17 - Média das respostas medidas nos pontos fatoriais e axiais

Fonte: Autoria própria (2018)

A Figura 5.17 ilustra, esquematicamente, o teste de curvatura apresentado nas Figuras 5.15 e 5.16. Como a quantidade de pontos fatoriais e centrais é idêntica para ambas as respostas

de interesse, a diferença entre médias torna-se o componente decisivo para o cálculo de F_0 , conforme indicado pela Equação 2.9 da seção 2.2.

Em outras palavras, quanto maior a diferença entre a média das respostas medidas nos pontos fatoriais e a média das respostas medidas nos pontos centrais, maior será o valor F_0 . Esse fato reduz a área delimitada sob a distribuição Fisher-Snedecor e, com isso, diminui o p -value. É exatamente por esse motivo que o p -value para a curvatura do Desgaste da Ferramenta possui magnitude de 0,011 e o p -value para a curvatura do Cavaco de Saída possui magnitude de apenas 0,001 (aproximadamente, 10 vezes menor).

f) **Passo 6B:** *Inclusão de pontos axiais no arranjo experimental*

Tabela 5.7 - Arranjo experimental CCD para o processo de usinagem ultrassônica de materiais cerâmicos investigado

Nº	Níveis dos parâmetros						Respostas	
	Avanço		Potência Ultrassônica		Rotação		Desgaste da Ferramenta	Cavaco de saída
	f ($\mu\text{m/s}$)		P (%)		r (rpm)		Tw (μm)	Ec (μm)
	Cod.	Decod.	Cod.	Decod.	Cod.	Decod.	-	-
Pontos fatoriais								
1	-1,00	7	-1,00	25	-1,00	1000	17,214	67,000
2	1,00	13	-1,00	25	-1,00	1000	18,704	59,670
3	-1,00	7	1,00	75	-1,00	1000	24,217	137,000
4	1,00	13	1,00	75	-1,00	1000	36,225	56,330
5	-1,00	7	-1,00	25	1,00	2000	18,232	40,330
6	1,00	13	-1,00	25	1,00	2000	17,039	53,670
7	-1,00	7	1,00	75	1,00	2000	21,720	49,000
8	1,00	13	1,00	75	1,00	2000	42,169	40,670
Pontos centrais								
9	0,00	10	0,00	50	0,00	1500	19,315	36,670
10	0,00	10	0,00	50	0,00	1500	20,517	34,000
11	0,00	10	0,00	50	0,00	1500	20,482	35,670
Pontos axiais								
12	-1,68	5	0,00	50	0,00	1500	Experimentos a serem realizados	
13	1,68	15	0,00	50	0,00	1500		
14	0,00	10	-1,68	8	0,00	1500		
15	0,00	10	1,68	92	0,00	1500		
16	0,00	10	0,00	50	-1,68	660		
17	0,00	10	0,00	50	1,68	2340		

Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2014a)

Uma vez que a condição imposta pelo Passo 5 encontra-se satisfeita, os pontos axiais podem ser incluídos na matriz experimental, terminando de estruturar o arranjo CCD. Como apresentado na seção 2.2, esses pontos extrapolam os níveis de cada fator, cada um a sua vez, compondo $2 \times k$ combinações possíveis.

No trabalho de Liu *et al.* (2014a), como $k = 3$, foram incluídos seis pontos axiais, com raio igual a 1,682, segundo o cálculo da Equação 2.3. A Tabela 5.7 fornece o arranjo CCD completo, contendo suas três tipologias de pontos.

g) **Passo 7: Condução de novos ensaios e mensuração das respostas de interesse**

Tabela 5.8 - Arranjo experimental CCD para o processo de usinagem ultrassônica de materiais cerâmicos investigado contendo todas as respostas

Nº	Níveis dos parâmetros						Respostas	
	Avanço		Potência Ultrassônica		Rotação		Desgaste da Ferramenta	Cavaco de saída
	f ($\mu\text{m/s}$)		P (%)		r (rpm)		T_w (μm)	E_c (μm)
	Cod.	Decod.	Cod.	Decod.	Cod.	Decod.	-	-
Pontos fatoriais								
1	-1,00	7	-1,00	25	-1,00	1000	17,214	67,000
2	1,00	13	-1,00	25	-1,00	1000	18,704	59,670
3	-1,00	7	1,00	75	-1,00	1000	24,217	137,000
4	1,00	13	1,00	75	-1,00	1000	36,225	56,330
5	-1,00	7	-1,00	25	1,00	2000	18,232	40,330
6	1,00	13	-1,00	25	1,00	2000	17,039	53,670
7	-1,00	7	1,00	75	1,00	2000	21,720	49,000
8	1,00	13	1,00	75	1,00	2000	42,169	40,670
Pontos centrais								
9	0,00	10	0,00	50	0,00	1500	19,315	36,670
10	0,00	10	0,00	50	0,00	1500	20,517	34,000
11	0,00	10	0,00	50	0,00	1500	20,482	35,670
Pontos axiais								
12	-1,68	5	0,00	50	0,00	1500	18,232	60,000
13	1,68	15	0,00	50	0,00	1500	26,751	62,000
14	0,00	10	-1,68	8	0,00	1500	15,709	91,670
15	0,00	10	1,68	92	0,00	1500	31,348	118,000
16	0,00	10	0,00	50	-1,68	660	24,096	61,000
17	0,00	10	0,00	50	1,68	2340	26,569	21,000

Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2014a)

De posse das coletas necessárias via arranjo experimental (Passo 6), devem ser conduzidos novos ensaios, com o objetivo de se mensurar as respostas de interesse nos pontos axiais. A Tabela 5.8 apresenta o resultado dessas novas coletas.

Nota-se, através dela, que os pontos axiais, por investigarem os processos sob condições mais “severas”, permitem a obtenção de respostas atípicas em relação ao conjunto de dados original (formado por pontos fatoriais e axiais). No arranjo fatorial, por exemplo, os menores desgastes da ferramenta foram observados quando a potência ultrassônica (p) foi colocada em 25%. No entanto, em um dos pontos axiais, quando p foi reduzida a apenas 8%, obteve-se o menor desgaste do experimento (15,709 μm).

De semelhante modo, o segundo maior cavaco foi obtido com uma potência de 92%, enquanto o terceiro foi coletado com potência de 8%, resultando em respostas iguais a 118 e 91,67 μm , respectivamente.

h) **Passo 8:** *Obtenção de um modelo estimado para cada resposta e análise*

Por mínimos quadrados ordinários (OLS), podem-se estimar os modelos para cada uma das variáveis de resposta medidas. As Figuras 5.18 e 5.19 fornecem os detalhes dos modelos obtidos. Embora alguns coeficientes apresentem p -values não significativos, são utilizados modelos completos, em face das discussões apresentadas na seção 5.2.4.

Termo	Coef	EP Coef	T	P
Constante	20,0768	1,3555	14,811	0,000
A:f	3,4474	0,6366	5,416	0,001
B:p	5,8171	0,6366	9,138	0,000
C:r	0,5096	0,6366	0,800	0,450
A*A:f*f	0,9399	0,7006	1,342	0,222
B*B:p*p	1,3066	0,7006	1,865	0,104
C*C:r*r	1,9444	0,7006	2,775	0,027
A*B:f*p	4,0200	0,8317	4,833	0,002
A*C:f*r	0,7197	0,8317	0,865	0,415
B*C:p*r	0,5118	0,8317	0,615	0,558

S = 2,35244 PRESS = 313,787
R-Sq = 95,45% R-Sq(adj) = 89,61%

Figura 5.18 - Modelo estimado para o Degaste da Ferramenta (Y1)

Fonte: Autoria própria (2018)

Termo	Coef	EP	Coef	T	P
Constante	35,9635	6,986	5,148	0,001	
A:f	-5,8305	3,281	-1,777	0,119	
B:p	7,8065	3,281	2,380	0,049	
C:r	-14,9084	3,281	-4,545	0,003	
A*A:f*f	7,2544	3,611	2,009	0,084	
B*B:p*p	22,7524	3,611	6,301	0,000	
C*C:r*r	0,1833	3,611	0,051	0,961	
A*B:f*p	-11,8762	4,286	-2,771	0,028	
A*C:f*r	11,6263	4,286	2,712	0,030	
B*C:p*r	-8,8737	4,286	-2,070	0,077	

S = 12,1233 PRESS = 8315,10
R-Sq = 92,96% R-Sq(adj) = 83,91%

Figura 5.19 - Modelo estimado para o Cavaco de Saída (Y2)

Fonte: Autoria própria (2018)

Ao se conduzirem as análises de convexidade, obtiveram-se autovalores com sinais positivos e negativos em ambos os modelos, o que indica a ocorrência de funções em formato de sela, conforme demonstrado pelas Figuras 5.20, 5.21, 5.22 e 5.23.

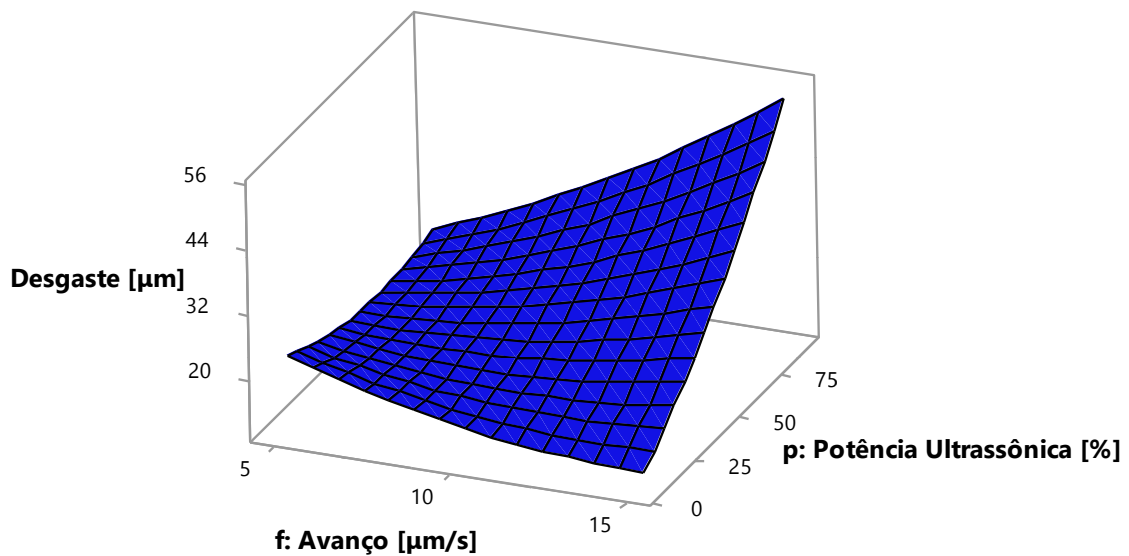


Figura 5.20 - Superfície de Resposta para o Desgaste da Ferramenta (Y1)

Fonte: Autoria própria (2018)

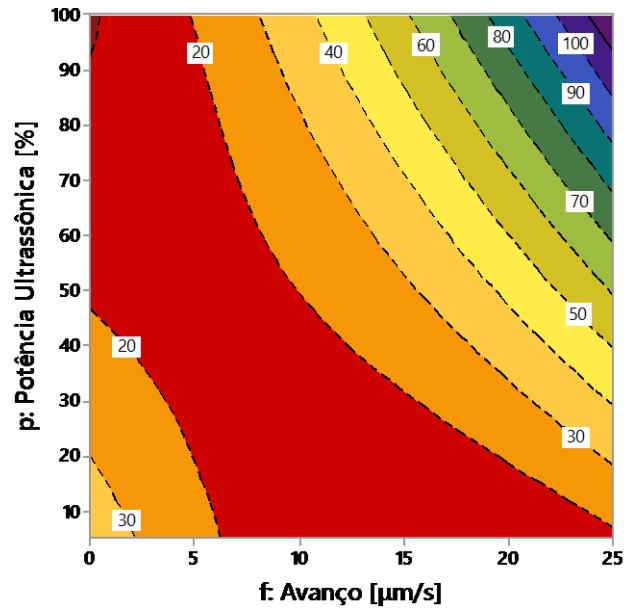


Figura 5.21 - Gráfico de Contorno para o Desgaste da Ferramenta (Y1)

Fonte: Autoria própria (2018)

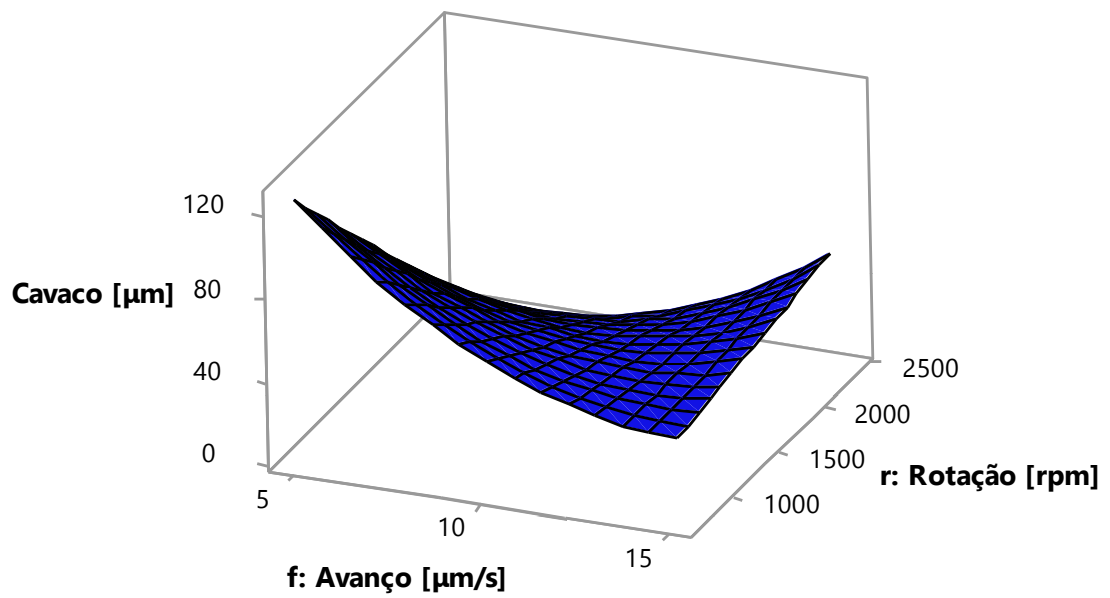


Figura 5.22 - Superfície de Resposta para o Cavaco de Saída (Y2)

Fonte: Autoria própria (2018)

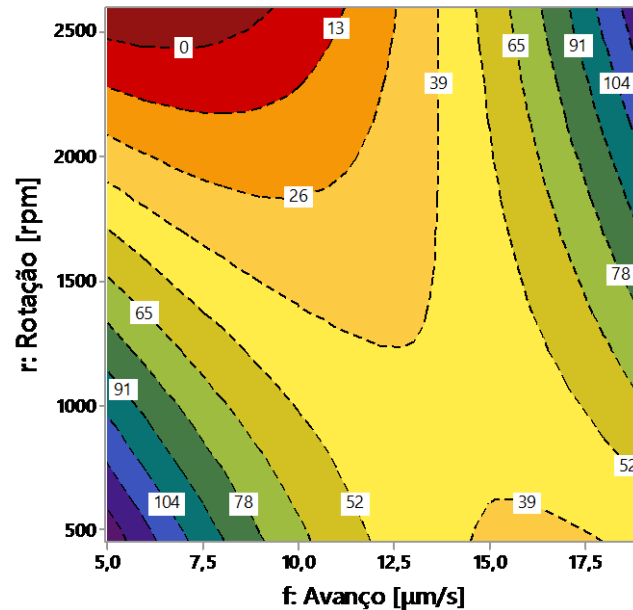


Figura 5.23 - Gráfico de Contorno para o Cavaco de Saída (Y2)

Fonte: A autoria própria (2018)

Essa constatação tipifica um dos inúmeros casos encontrados ao longo do levantamento da seção 5.2.4. Além disso, como se deseja a minimização de ambas as respostas (Desgaste da Ferramenta e Cavaco de Saída), tem-se, também, que o sentido de otimização é incompatível com a convexidade da função.

Em uma segunda análise, pode-se observar a presença de correlação entre os modelos, embora esta se apresente como moderada ($\rho = 0,648$). Isso demonstra que a otimização convencional não pode ser conduzida, visto que as funções objetivo revelam dependência linear, conforme foi descrito na seção 5.2.3.

i) **Passo 9:** *Equacionamento e solução do problema de otimização*

Tendo em vista os modelos estimados no Passo 8, a problema multiojetivo pode ser equacionado da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar} && Y_1(\mathbf{x}) \\
 & \text{Minimizar} && Y_2(\mathbf{x}) \\
 & \text{Sujeito a:} && \mathbf{x}^T \mathbf{x} \leq \rho^2
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Dada a existência de correlação significativa entre $Y_1(x)$ e $Y_2(x)$, a Análise de Componentes Principais (PCA) emerge como um método conveniente para a solução do problema expresso pela Equação 5.1, conforme discutido na seção 2.4.2. A partir dela, podem ser obtidos dois componentes principais, segundo expresso pela análise de autovalores da matriz de correlação apresentada na Tabela 5.9, onde PC1 representa o Cavaco de Saída (Y2) e PC2 representa o Desgaste da Ferramenta (Y1).

Tabela 5.9 - Análise de autovalores da matriz de correlação

	PC1	PC2
Autovalor	1,032	0,968
Proporção	0,516	0,484
Acumulado	0,516	1,000

Fonte: Autoria própria (2018)

Por mínimos quadrados ordinários (OLS), podem-se estimar os modelos para cada um dos componentes obtidos, resultando nas análises das Figuras 5.24 e 5.25. Embora alguns coeficientes apresentem *p-values* não significativos, são utilizados modelos completos, conforme foi realizado para as respostas originais.

Embora não figure entre os objetivos do presente trabalho o detalhamento dos diferentes tipos de métodos de otimização existentes, esta seção aplica o método conhecido como Interseção Normal à Fronteira (*Normal Boundary Intersection – NBI*), para completar a última etapa da MSR (COSTA *et al.*, 2016b).

Termo	Efeito	Coef	EP	Coef	T	P	VIF
Constante		0,241		0,205	1,18	0,278	
A	0,9409	0,4705		0,0963	4,89	0,002	1,00
B	0,7621	0,3811		0,0963	3,96	0,005	1,00
C	0,7963	0,3981		0,0963	4,13	0,004	1,00
A*A	-0,157	-0,079		0,106	-0,74	0,482	1,16
B*B	-0,811	-0,406		0,106	-3,83	0,006	1,16
C*C	0,368	0,184		0,106	1,74	0,126	1,16
A*B	1,335	0,667		0,126	5,30	0,001	1,00
A*C	-0,404	-0,202		0,126	-1,61	0,152	1,00
B*C	0,514	0,257		0,126	2,04	0,080	1,00
S	R-sq	R-sq(adj)					
0,355869	94,27%	86,91%					

Figura 5.24 - Modelo estimado para PC1

Fonte: Autoria própria (2018)

Termo	Efeito	Coef	EP Coef	T	P	VIF
Constante		0,241	0,205	1,18	0,278	
A	0,9409	0,4705	0,0963	4,89	0,002	1,00
B	0,7621	0,3811	0,0963	3,96	0,005	1,00
C	0,7963	0,3981	0,0963	4,13	0,004	1,00
A*A	-0,157	-0,079	0,106	-0,74	0,482	1,16
B*B	-0,811	-0,406	0,106	-3,83	0,006	1,16
C*C	0,368	0,184	0,106	1,74	0,126	1,16
A*B	1,335	0,667	0,126	5,30	0,001	1,00
A*C	-0,404	-0,202	0,126	-1,61	0,152	1,00
B*C	0,514	0,257	0,126	2,04	0,080	1,00
S	R-sq	R-sq(adj)				
0,355869	94,27%	86,91%				

Figura 5.25 - Modelo estimado para PC2

Fonte: Autoria própria (2018)

No caso analisado, Liu *et al.* (2014a) se utilizaram do método *Desirability* sobre as respostas originais, com auxílio do pacote comercial *Minitab*. No entanto, devido à incompatibilidade entre convexidade e sentido de otimização dos modelos (caso típico entre os trabalhos analisados), torna-se necessário o uso da restrição do espaço experimental, como foi discutido na seção 5.2.3.

Uma vez que o *Minitab* não contempla o uso dessa restrição em seu algoritmo de otimização, optou-se pela utilização do NBI. Além disso, muitas vantagens do método corroboram com essa escolha, como pode ser verificado em algumas aplicações da área de manufatura avançada (COSTA *et al.*, 2016a).

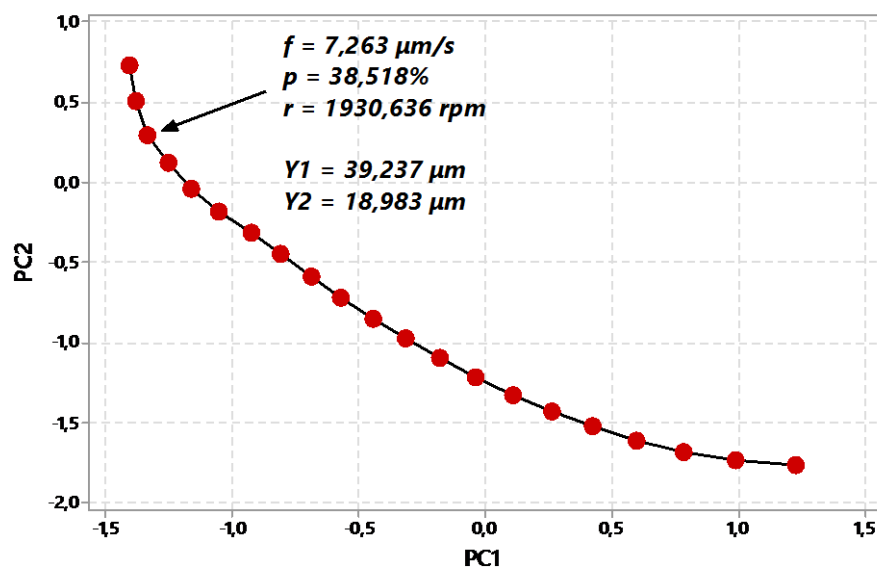


Figura 5.26 - Fronteira de Pareto obtida da combinação PCA-NBI

Fonte: Autoria própria (2018)

Ao se empregar o algoritmo Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) para se estabelecer uma subrotina do NBI, podem-se obter diferentes combinações ótimas para os componentes principais PC1 e PC2, priorizando-se a minimização de PC1 (e, portanto, do Cavaco de Saída) ao se utilizar pesos w_i menores e priorizando-se a minimização de PC2 (e, portanto, do Desgaste da Ferramenta) ao se utilizar pesos w_i maiores. A Figura 5.26 apresenta a fronteira de Pareto para as diferentes combinações de pesos do NBI em intervalos de 5%.

Isso significa, por exemplo, que, para se obter um desgaste (Y1) de, aproximadamente, 39 μm e uma cavaco (Y2) de, aproximadamente, 19 μm , são necessários que os parâmetros de corte assumam os valores $f = 7,263 \mu\text{m/s}$, $p = 38,518\%$ e $r = 1930,636 \text{ rpm}$. A depender da característica mais importante (Y1 ou Y2), poderão ser escolhidos diferentes pontos da fronteira ilustrada na Figura 5.26.

6 CONCLUSÕES

A Metodologia de Superfície de Resposta caminha para quase sete décadas de suas primeiras conceituações. Embora muitas de suas dimensões continuem sendo estudadas atualmente, sua origem não deixa dúvidas sobre a importante lacuna preenchida pelas ideias de Box e Wilson (1951). A concepção de um método capaz de modelar e otimizar processos com base em um pequeno número de parâmetros de controle proporcionou novos rumos para as pesquisas do século XX.

Ao longo do tempo, porém, parece ter havido certa descentralização da metodologia, na medida em que foram incorporadas técnicas típicas de outras áreas do conhecimento e desenvolvidos métodos para tratar algumas de suas particularidades. Em meio a esse conjunto de “técnicas e métodos”, a literatura se distanciou de um enfoque estrutural, apresentando análises mais abrangentes em vez de etapas bem definidas.

De modo geral, porém, pode-se dizer que a Metodologia de Superfície de Resposta é uma maneira organizada de se explorar determinada região de um processo, a partir da unificação entre planejamento e análise de experimentos, técnicas de modelagem e métodos de otimização. Com base nisso, pode-se dizer também que, nesses componentes, residem os critérios, ou aspectos críticos, para a boa qualidade de suas análises.

Nesse contexto, a fim de se verificar as condições atuais de aplicação da MSR, o presente trabalho realizou um vasto levantamento em manufatura avançada, considerando aspectos como a definição de variáveis de entrada, o uso de pontos centrais, a determinação das regiões

de curvatura, da convexidade das funções e de seus sentidos de otimização, a avaliação de correlação entre respostas, a quantidade típica de funções objetivo e o uso de restrições do espaço experimental.

Com esse procedimento, foram realizados 358 cálculos, envolvendo a reprodução de 107 arranjos fatoriais com pontos centrais e de seus respectivos testes de curvatura, a modelagem de 123 superfícies de resposta e a condução de suas respectivas análises de autovalores, bem como a avaliação de 128 pares de modelos estimados, para os quais foram realizadas análises de correlação de Pearson.

Somado a isso, 589 informações adicionais foram extraídas dos trabalhos investigados, contendo as quantidades de parâmetros de controle, de variáveis de resposta, de ensaios experimentais (fatoriais, centrais e axiais), bem como os sentidos de otimização atribuídos pelos autores às variáveis de resposta, as condições de rotacionalidade dos arranjos e os tipos de modelos utilizados (quadrático completo, quadrático reduzido e suas derivações).

Ao todo, portanto, 947 dados foram processados, formando os resultados apresentados na seção 5. Por meio deles, foi possível obter inúmeras constatações acerca do uso da MSR e, como consequência, visitar um caso típico dentre os trabalhos investigados. Além disso, com base nas análises, foram identificadas muitas oportunidades de pesquisa na área, as quais deram origem a muitos estudos que se encontram em fase de desenvolvimento.

Em termos específicos, um dos primeiros resultados deste trabalho advém da constatação empírica de que todos os processos investigados, independentemente dos fenômenos que os envolvem, apresentam quantidade igual ou inferior a cinco parâmetros de controle. Esse fato, embora já conhecido em teoria, reforça o poder analítico da etapa de modelagem, tendo em vista que, tanto processos simples como complexos, experimentais ou simulados, serão controlados por apenas algumas poucas variáveis de entrada.

Além disso, a identificação desse resultado em processos de manufatura também fomenta investigações semelhantes em outras áreas do conhecimento, as quais, em conjunto com a presente análise, poderão viabilizar explicações mais detalhadas, a nível dos fenômenos, dos motivos pelos quais esse fato se reproduz, sendo reconhecido como verdadeiro inclusive pela literatura clássica.

A alta taxa de modificações na quantidade de pontos centrais também constitui-se de uma importante descoberta, haja vista que os demais tipos de pontos dos arranjos CCD não são alterados em nenhum dos casos investigados, sendo utilizados conforme prescrito na literatura. Assim, esse fato inicia um debate mais amplo sobre a influência desses pontos em análises

experimentais e levanta novas oportunidades de pesquisa, ao sugerir que esse acontecimento possa ocorrer pela falta de uma referência sumária, que incorpore simultaneamente as características típicas dos arranjos e seus impactos sobre os modelos produzidos.

De outro lado, a ocorrência maciça de pares de modelos correlacionados e de modelos em formato de sela configura, talvez, o principal resultado deste trabalho. Em primeiro lugar, pelo fato de conhecidamente interferirem nas análises experimentais e, apesar disso, serem negligenciados por quase a totalidade dos estudos investigados. Em segundo lugar, por ter sido constatado que grande parte dos modelos em formato de sela se dá em regiões onde não há curvatura e, associado a isso, por poucas aplicações terem mencionado os testes de curvatura, reforçando a tese de que, na prática, há pouca compreensão dos fundamentos da MSR.

Além disso, a influência dos termos dos modelos sobre a convexidade das funções não se mostrou tão óbvia para modelos em formato de sela, embora tenha sido observado que a ocorrência de funções côncavas só é possível quando da utilização de termos quadráticos. Com esse mesmo direcionamento, nenhuma relação foi identificada entre convexidade e rotacionalidade, conquanto a distância axial seja responsável por melhores estimativas dos coeficientes dos termos quadráticos.

A distribuição equânime entre modelos com sentidos de minimização e de maximização também foi confirmada por meio das análises do presente estudo. Por outro lado, foi observado que a maior parte dos modelos possui incompatibilidade entre convexidade e sentido de otimização. Essa constatação chama a atenção para estudos em MSR, confirmando a necessidade de utilização de restrições do espaço experimental. Opostamente, quase nenhum dos estudos investigados as incluem ou sequer as comentam.

Dado o exposto, pode-se, agora, com muito mais argumentos, revisitar a problemática apresentada na primeira seção deste trabalho, por meio da qual foram lançadas suspeitas sobre a real compreensão dos autores da área acerca dos fundamentos da Metodologia de Superfície de Resposta. Em uma visão comparativa, foi sugerido que a MSR vem sendo abordada fora de seu escopo original, assim como ocorreram com os métodos de Taguchi há algumas décadas.

Com base nas análises da seção 5, pode-se dizer que, não apenas o escopo original tem sido distorcido, como também novos equívocos têm ocorrido pela negligência de aspectos críticos desenvolvidos em estudos posteriores. Em uma perspectiva mais ampla, pode-se tentar justificar esse fato pela ausência de abordagens estruturalistas que sejam capazes de compatibilizar fidelidade ao método e praticidade operacional.

Nesse sentido, o presente trabalho buscou preencher parte dessa lacuna, ao fornecer uma discussão teórica com foco na viabilização de aplicações mais confiáveis. Além disso, este estudo acabou por abrir espaço para muitas outras investigações, envolvendo tanto os aspectos críticos suscitados como análises das relações identificadas entre eles.

6.1 Contribuições do trabalho

A contribuição sumária do presente estudo constitui-se do diagnóstico de aplicações da Metodologia de Superfície de Resposta na área de manufatura. No entanto, este trabalho fornece muitas outras contribuições, as quais, em conjunto com a principal, podem ser resumidas da seguinte forma:

- 1) Elaboração de um conteúdo integrado da Metodologia de Superfície de Resposta, envolvendo tanto um roteiro prático para sua condução quanto o detalhamento de aspectos intervenientes na qualidade de suas conclusões;
- 2) Apresentação de um diagnóstico de aplicações da Metodologia de Superfície de Resposta na área de manufatura, por meio do julgamento de treze hipóteses de pesquisa;
- 3) Identificação de inconsistências em alguns dos trabalhos analisados, como a desconsideração do princípio da hierarquia e a não utilização de múltiplos pontos centrais; e
- 4) Levantamento de novas oportunidades de pesquisa na área, como a realização de comparativos entre arranjos experimentais e a utilização de análises multivariadas e métodos de otimização.

6.2 Sugestões para estudos futuros

Trabalhos futuros poderão abordar diversas dimensões do presente trabalho, tais como:

- 1) A construção de modelos matemáticos que demonstrem analiticamente a inexistência de associação entre rotacionalidade e convexidade;
- 2) A construção de modelos matemáticos que demonstrem analiticamente as distorções causadas na convexidade de funções quadráticas estimadas em regiões planas (ou, sem curvatura);

- 3) O projeto de um número adequado de pontos centrais em arranjos CCD, para diferentes quantidades de fatores, que incorpore alternativas consistentes para a obtenção de respostas com variabilidade natural (*within*) nos casos em que são utilizados estudos numéricos e respostas calculadas ou aplicadas técnicas multivariadas como a Análise de Componentes Principais (PCA); e
- 4) Análises mais aprofundadas, à nível dos fenômenos, que justifiquem o controle de processos de manufatura por, no máximo, cinco parâmetros.

REFERÊNCIAS

ABUHABAYA, Abdullah; FIELDHOUSE, John; BROWN, David. The optimization of biodiesel production by using response surface methodology and its effect on compression ignition engine. **Fuel processing technology**, v. 113, p. 57-62, 2013. DOI 10.1016/j.fuproc.2013.03.025

AGGARWAL, Vivek; KHANGURA, Sehijpal Singh; GARG, R. K. Parametric modeling and optimization for wire electrical discharge machining of Inconel 718 using response surface methodology. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 79, n. 1-4, p. 31-47, 2015. DOI 10.1007/s00170-015-6797-8

AGRESTI, Alan. **Categorical Data Analysis**. 2 ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2002.

AHMADNIA, Masoud; SHAHRAKI, Saeid; KAMARPOSHTI, Mojtaba Ahmadi. Experimental studies on optimized mechanical properties while dissimilar joining AA6061 and AA5010 in a friction stir welding process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 87, n. 5-8, p. 2337-2352, 2016. DOI 10.1007/s00170-016-8636-y

AMDOUNI, Hatem; BOUZAIENE, Hassen; MONTAGNE, Alex; NASRI, Mustapha; IOST, Alain. Modeling and optimization of a ball-burnished aluminum alloy flat surface with a crossed strategy based on response surface methodology. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 88, n. 1-4, p. 801-814, 2017. DOI 10.1007/s00170-016-8817-8

ARABY, Sherif; ZAIED, Roubi; HARIDY, Salah; KAYTBAY, Saleh. Grooves into cylindrical shapes by wire electrochemical machining. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 90, n. 1-4, p. 445-455, 2017. DOI 10.1007/s00170-016-9389-3

AUGUSTIN, G.; DAVILA, S.; UDILLJAK, T.; STAROVESKI, T.; BREZAK, D.; BABIC, S. Temperature changes during cortical bone drilling with a newly designed step drill and an internally cooled drill. **International Orthopaedics**, v. 36, n. 7, p. 1449-1456, 2012. DOI 10.1007/s00264-012-1491-z

AYYAPPAN, S.; SIVAKUMAR, K. Experimental investigation on the performance improvement of electrochemical machining process using oxygen-enriched electrolyte. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 75, n. 1-4, p. 479-487, 2014. DOI 10.1007/s00170-014-6096-9

AZAM, Muhammad; JAHANZAIB, Mirza; WASIM, Ahmad; HUSSAIN, Salman. Surface roughness modeling using RSM for HSLA steel by coated carbide tools. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 78, p. 1031-1041, 2015. DOI 10.1007/s00170-014-6707-5

BAJÍC, D.; LELA, B.; ŽIVKOVIĆ, D. Modeling of machined surface roughness and optimization of cutting parameters in face milling. **Metalurgija**, v. 47, n. 4, p. 331-334, 2008.

BARKER, Thomas B. **Engineering quality by design: interpreting the Taguchi approach**. Nova York: Marcel Dekker Inc., 1990.

BENARDOS, P. G.; VOSNIAKOS, G. C. Predicting surface roughness in machining: a review, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 8, p. 833-844, 2003. DOI 10.1016/S0890-6955(03)00059-2

BEZERRA, Marcos Almeida; SANTELLI, Ricardo Erthal; OLIVEIRA, Eliane Padua; VILLAR, Leonardo Silveira; ESCALEIRA, Luciane Amélia. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. **Talanta**, n. 76, p. 965-977, 2008. DOI 10.1016/j.talanta.2008.05.019

BOX, George E. P. Exploration and Exploitation of Response Surfaces: Some General Considerations and Examples. **Biometrics**, v. 10, n. 1, p. 16-60, 1954.

BOX, George E. P.; DRAPER, Norman R. **Response surfaces, mixtures, and ridge analyses**. 2 ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.

BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S. The 2k-p Fractional Factorial Designs Part. **Technometrics**, v. 3, n. 3, p. 311-351, 1961.

BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S.; HUNTER, W. G. **Statistics for Experimenters: Design, Innovation and Discovery**. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 2005.

BOX, G. E. P.; WILSON, K. B. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 13, n. 1, p. 1-45, 1951.

BRATCHELL, N. Multivariate Response Surface Modelling by Principal Components Analysis. **Journal of Chemometrics**, v. 3, p. 579-588, 1989. DOI 10.1002/cem.1180030406

BRIGHTMAN, H.J. Optimization through experimentation: applying Response Surface Methodology. **Decision Sciences**, v. 9, n. 3, p. 481-495, 1978. DOI 10.1111/j.1540-5915.1978.tb00737.x

CASELLA, George; BERGER, Roger. **Statistical Inference**. Pacific Groove: Duxbury Press, 2011.

CAI, Y.; WANG, X. S.; YUAN, S. J. Pre-form design for hydro-forming of aluminum alloy automotive cross members. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 86, n. 1-4, p. 463–473, 2016. DOI 10.1007/s00170-015-8160-5

CHADEGANI, Arezoo Aghaei; SALEHI, Hadi; YUNUS, Melor Md; FARHADI, Hadi; FOOLADI, Masood; FARHADI, Maryam; EBRAHIM, Nader Ale. A Comparison between Two Main Academic Literature Collections: Web of Science and Scopus Databases. **Asian Social Science**, 2013, v. 9, n. 5, p.18-26, 2013. DOI 10.5539/ass.v9n5p18

CHENG, Shao-Wei; WU, C. F. J. Factor screening and response surface exploration. **Statistica Sinica**, v. 11, p. 553-604, 2001.

COSTA, Danielle Martins Duarte; BRITO, Tarcísio Gonçalves; PAIVA, Anderson Paulo de; LEME, Rafael Coradi; BALESTRASSI, Pedro Paulo. A normal boundary intersection with multivariate mean square error approach for dry end milling process optimization of the AISI 1045 steel. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 1658-1672, 2016a. DOI 10.1016/j.jclepro.2016.01.062

COSTA, D. M. D.; PAULA, T. I.; SILVA, P. A. P.; PAIVA, A. P. Normal boundary intersection method based on principal components and Taguchi's signal-to-noise ratio applied to the multiobjective optimization of 12L14 free machining steel turning process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 87, n. 1-4, p. 825–834, 2016b. DOI 10.1007/s00170-016-8478-7

ĐẶNG, Tân-Hiệp; CHEN, Bing-Hung; LEE, Duu-Jong. Optimization of biodiesel production from transesterification of triolein using zeolite LTA catalysts synthesized from kaolin clay. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, p. 1-9, 2017. DOI 10.1016/j.jtice.2017.03.009

DAOUD, M.; JOMAA, W.; CHATELAIN, J. F.; BOUZID, A. A machining-based methodology to identify material constitutive law for finite element simulation. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 77, n. 19-12, p. 2019–2033, 2015. DOI 10.1007/s00170-014-6583-z

DASGUPTA, Anirban. **Asymptotic theory of statistics and probability**. New York: Springer, 2008.

DEB, Kalyanmoy; SINDHYA, Karthik; HAKANEN, Jussi. **Multi-Objective Optimization**. In: SENGUPTA, Raghu Nandan; GUPTA, Aparna; DUTTA, Joydeep. *Decision Sciences: Theory and Practice*. Boca Raton: Taylor and Francis, pp.146-179, 2017.

DEL CASTILHO, Enrique. **Process Optimization: a statistical approach**. New York: Springer, 2007.

DEL CASTILHO, Enrique; CAHYA, Suntara. A Tool for Computing Confidence Regions on the Stationary Point of Response Surface. **The American Statistician**, v. 55, n. 4, p. 358-365, 2001.

DINIZ, A.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 9 ed. São Paulo: Artliber, 2014.

DUINEVELD, C.A.A.; BRUINS, C.H.P.; SMILDE, A.K.; BOLHUIS, G.K.; ZUURMAN, K.; DOORNBOS, D.A. **Multicriteria steepest ascent**. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, v. 25, n. 2, p. 183-201, 1994. DOI 10.1016/0169-7439(94)85042-9

EDWARDS, J. R. **Polynomial regression and response surface methodology**. In: OSTROFF, C.; JUDGE, T. A. *Perspectives on organizational fit*. San Francisco: Jossey-Bass, pp. 361-372, 2007.

EKICI, Ergün; MOTORCU, Ali Riza. Evaluation of drilling Al/SiC composites with cryogenically treated HSS drills. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 74, n. 9, p. 1495-1505, 2014. DOI 10.1007/s00170-014-6085-z

FIOD NETO, Miguel. **Taguchi e a melhoria da qualidade: uma releitura crítica**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1997.

FORBES, C.; EVANS, M.; HASTINGS, N.; PEACOCK, B. **Statistical Distributions**. 4 ed. John Wiley & Sons: Hoboken, 2010. DOI 10.1002/9780470627242.ch20

FORZA, Cipriano. Survey research in operations management: a process-based perspective. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 152-194, 2002. DOI 10.1108/01443570210414310

GHAEDI, M., HAJJATI, S., MAHMUDI, Z., TYAGI, I., AGARWAL, S., MAITY, A., GUPTA, V.K. Modeling of competitive ultrasonic assisted removal of the dyes - Methylene blue and Safranin-O using Fe₃O₄ nanoparticles. **Chemical Engineering Journal**, v. 268, p. 28-37, 2015. DOI 10.1016/j.cej.2014.12.090

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOMES, J.H.F.; PAIVA, A.P.; COSTA, S.C.; BALESTRASSI, P.P.; PAIVA, E.J. Weighted Multivariate Mean Square Error for processes optimization: A case study on flux-cored arc welding for stainless steel claddings. **European Journal of Operational Research**, v. 226, p. 522-535, 2013. DOI 10.1016/j.ejor.2012.11.042

GOMES, José Henrique de Freitas; SALGADO JÚNIOR, Aluizio Ramos; PAIVA, Anderson Paulo de; FERREIRA, João Roberto; COSTA, Sebastião Carlos da; BALESTRASSI, Pedro Paulo. Global Criterion Method Based on Principal Components to the Optimization of Manufacturing Processes with Multiple Responses. **Journal of Mechanical Engineering**, v. 58, n. 5, p. 345-353, 2012. DOI 10.5545/sv-jme.2011.136

GOOS, Peter; JONES, Bradley. **Optimal Design of Experiments: a case study approach**. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.

GUO, Wei; HUA, Lin; MAO, Huajie. Minimization of sink mark depth in injection-molded thermoplastic through design of experiments and genetic algorithm. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 72, n. 1-4, p. 365-375, 2014. DOI 10.1007/s00170-013-5603-8

GUZ, A. N.; RUSHCHITSKY, J. J. Scopus: a system for the evaluation of scientific journals. **International Applied Mechanics**, v. 45, n. 4, p. 351-362, 2009. DOI 10.1007/s10778-009-0189-4

HADAD, Mohammadjafar. An experimental investigation of the effects of machining parameters on environmentally friendly grinding process. **Journal of Cleaner Production**, v. 108, p. 217-231, 2015. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.05.092

HAMDAN, M. A.; TSOKOS, Chris P. An Information Measure of Association in Contingency Tables. **Information and Control**, v. 19, n. 2, p. 174-179, 1971. DOI 10.1016/S0019-9958(71)90799-6

HASAN, Mohammed M.; ISHAK, M.; REJAB, M.R.M. Influence of machine variables and tool profile on the tensile strength of dissimilar AA7075-AA6061 friction stir welds. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 90, n. 9-12, p. 2605–2615, 2017. DOI 10.1007/s00170-016-9583-3

HASHMI, Khalid H.; ZAKRIA, Ghulam; RAZA, Muhammad Baqar; KHALIL, Shahid. Optimization of process parameters for high speed machining of Ti-6Al-4V using response surface methodology. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 85, n. 5-8, p. 1847–1856, 2016. DOI 10.1007/s00170-015-8057-3

HASSAN, M. H.; OTHMAN, A. R.; KAMARUDDIN, S. The use of response surface methodology (RSM) to optimize the acid digestion parameters in fiber volume fraction test of aircraft composite structures. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 90, n. 9-12, p. 3739–3748, 2017. DOI 10.1007/s00170-016-9683-0

HOSSEINZADEH, Morteza; MOUZIRAJI, Mehran Ghasempour. An analysis of tube drawing process used to produce squared sections from round tubes through FE simulation and response surface methodology. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 87, n. 5-8, p. 2179–2194, 2016. DOI 10.1007/s00170-016-8532-5

HOURMAND, Mehdi; FARAHANY, Saeed; SARHAN, Ahmed A. D.; NOORDIN, Mohd Yusof. Investigating the electrical discharge machining (EDM) parameter effects on Al-Mg₂Si metal matrix composite (MMC) for high material removal rate (MRR) and less EWR–RSM approach. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2015. DOI 10.1007/s00170-014-6491-2

HOERL, Roger W. Ridge Analysis 25 Years Later. **The American Statistician**, v. 39, n. 3, p. 186-192, 1985. DOI 10.2307/2683926

HUANG, Changwu; RADI, Bouchaïb; HAMI, Abdelkhalak El. Uncertainty analysis of deep drawing using surrogate model based probabilistic method. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 86, n. 9-12, p. 3229–3240, 2016. DOI 10.1007/s00170-016-8436-4

JAHANZAIB, Mirza; HUSSAIN, Salman; WASIM, Ahmad; AZIZ, Haris; MIRZA, Adnan; ULLAH, Saif. Modeling of weld bead geometry on HSLA steel using response surface

methodology. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 89, n. 5-8, p. 2087–2098, 2017. DOI 10.1007/s00170-016-9213-0

JAIN, Anil Kumar; PANDEY, Pulak M. Experimental studies on tool wear in μ -RUM process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 85, n. 9-12, p. 2125–2138, 2016. DOI 10.1007/s00170-015-8248-y

JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. 6 ed. Nova Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007.

KANT, Girish; SANGWAN, Kuldip Singh. Prediction and optimization of machining parameters for minimizing power consumption and surface roughness in machining. **Journal of Cleaner Production**, v. 83, p. 151-164, 2014. DOI 10.1016/j.jclepro.2014.07.073

KHORAN, M.; GHABEZI, P.; FRAHANI, M.; BESHARATI, M. K. Investigation of drilling composite sandwich structures. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 76, n. 9-12, p. 1927-1936, 2015. DOI 10.1007/s00170-014-6427-x

KHURI, André. I.; CORNELL, John A. **Response surface: design and analyses**. 2 ed. New York: Marcel Dekker Inc., 1996.

KHURI, André I.; MUKHOPADHYAY, Siuli. **Response surface methodology**. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, v. 2, n. 2, p. 128-149, 2010. DOI 10.1002/wics.73

KORRA, Nanda Naik; VASUDEVAN, M.; BALASUBRAMANIAN, K. R. Multi-objective optimization of activated tungsten inert gas welding of duplex stainless steel using response surface methodology. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 77, n. 1-4, p. 67–81, 2015. DOI 10.1007/s00170-014-6426-y

KUMAR, Nikhil; MUKHERJEE, Manidipto, BANDYOPADHYAY, Asish. Comparative study of pulsed Nd:YAG laser welding of AISI 304 and AISI 316 stainless steels. *Optics & Laser Technology*, v. 88, p. 24-39, 2017.

KUMARA, Chandan; DASA, Manas; PAUL, C. P.; SINGH, B. Experimental investigation and metallographic characterization of fiber laser beam welding of Ti-6Al-4V alloy using response surface method. *Optics and Lasers in Engineering*, v. 95, p. 52-68, 2017.

LEITHOLD, Louis. **O cálculo com geometria analítica**. 3 ed. São Paulo: HARBRA, 1994.

LIN, D. K. J.; PETERSON, J. J. **Statistical inference for response surface optima**. In: KHURI, André. *Response Surface Methodology and related topics*. Hackensack: World Scientific Publishing, pp. 65-88, 2006.

LIN, Y. C.; TSAO, C. C.; HSU, C. Y.; HUNG, S. K.; WEN, D. C. Evaluation of the characteristics of the microelectrical discharge machining process using response surface methodology based on the central composite design. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 62, p. 1013-1023, 2012. DOI 10.1007/s00170-011-3745-0

LIU, Shuang; KOVACEVIC, Radovan. Statistical analysis and optimization of processing parameters in high-power direct diode laser cladding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 74, n. 5-8, p. 867–878, 2014. DOI 10.1007/s00170-014-6041-y

LIU, Jun Wei; BAEK, Dae Kyun; KO, Tae Jo. Chipping minimization in drilling ceramic materials with rotary ultrasonic machining. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 72, n. 9-12, p. 1527–1535, 2014a. DOI 10.1007/s00170-014-5766-y

LIU, Zhiqiang; WANG, Chengdong; CHEN, Ming; GE, Chunxin; LI, Mingchao. A Coupling Response Surfaces Methodology of Multiple Constraints (CRSMMC) for parameters optimization of broach tool in broaching of heat-resistant steel X12CrMoWVNb N-10-1-1. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 74, n. 9-12, p. 1719–1732, 2014b. DOI 10.1007/s00170-014-6109-8

LOTFI, A. H.; NOUROUZI, S. Predictions of the optimized friction stir welding process parameters for joining AA7075-T6 aluminum alloy using preheating system. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 73, n. 9-12, p. 1717–1737, 2014. DOI 10.1007/s00170-014-5963-8

LUNDSTEDT, T.; SEIFERT, E.; ABRAMO, L.; THELIN, B.; NYSTROM, A.; PERTENSEN, J.; BERGMAN, R. Experimental design and optimization. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 42, p. 3-40, 1998. DOI 10.1016/S0169-7439(98)00065-3

MAHESH, G.; MUTHU, S.; DEVADASAN, S. R. Prediction of surface roughness of end milling operation using genetic algorithm. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 77, n. 1-4, p. 369–381, 2016. DOI 10.1007/s00170-014-6425-z

MAJI, Kuntal; PRATIHAR, D. K.; NATH, A. K. Experimental investigations, modeling, and optimization of multi-scan laser forming of AISI 304 stainless steel sheet. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 83, n. 9-12, p. 1441–1455, 2016. DOI 10.1007/s00170-015-7675-0

MARTINS, Roberto Antonio; MELLO, Carlos Henrique Pereira; TURRIONI, João Batista. **Guia para elaboração de monografia e TCC em Engenharia de Produção**. São Paulo: Atlas, 2014.

MEDDOUR, I.; YALLESE, M. A.; KHATTABI, R.; ELBAH, M.; BOULANOUAR, L. Investigation and modeling of cutting forces and surface roughness when hard turning of AISI 52100 steel with mixed ceramic tool: cutting conditions optimization. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 77, n. 5-8, p. 1387–1399, 2015. DOI 10.1007/s00170-014-6559-z

MIA, Mozammel; KHAN, Md Awal; DHAR, Nikhil Ranjan. High-pressure coolant on flank and rake surfaces of tool in turning of Ti-6Al-4V: investigations on surface roughness and tool wear. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 90, n. 5, p. 1825–1834, 2017. DOI 10.1007/s00170-016-9512-5

MIETTINEN, Kaisa. **Nonlinear Multiobjective Optimization**. Norwell: Kluwer, 1999.

MONTGOMERY, D. C. **Designs and Analysis of Experiments**. 7 ed. John Wiley & Sons, 2009.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, George C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 6 ed. LTC, 2016.

MOSTAAN, Hossein; SHAMANIAN, Morteza; SAFARI, Mehdi. Process analysis and optimization for fracture stress of electron beam welded ultra-thin FeCo-V foils. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 87, n. 1-4, p. 1045–1056, 2016. DOI 10.1007/s00170-016-8553-0

MOSTAFAPOUR, Amir; EBRAHIMPOUR, Ali; SAEID, Tohid. Finite element investigation on the effect of FSSW parameters on the size of welding subdivided zones in TRIP steels. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 88, n. 1-4, p. 277–289, 2017. DOI 10.1007/s00170-016-8749-3

MYERS, Raymond H.; KURI, André. I.; CARTER, Walter H. Response surface methodology: 1966-1988. **Technometrics**, v. 31, n. 2, p. 137-157, 1989.

MYERS, Raymond H.; MONTGOMERY, Douglas C. **Response Surface Methodology: process and product optimization using designed experiments**. 3 ed. Nova York: John Wiley & Sons, 2009.

MYSZKA, David. A Single Session, Laboratory Primer On Taguchi Methods. In: American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition, 2001, Albuquerque. **Proceedings of the American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition**. Albuquerque: American Society for Engineering Education, 2001.

NAVES, Fabiano Luiz; PAULA, Taynara Incerti de; BALESTRASSI, Pedro Paulo; BRAGA, Washington Luis Moreira; SAWHNEY, Rapinder Singh; PAIVA, Anderson Paulo de. Multivariate Normal Boundary Intersection based on rotated factor scores: A multiobjective optimization method for methyl orange treatment. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 413-439, 2017. DOI 10.1016/j.jclepro.2016.12.092

ÖKTEM, H.; ERZURUMLU, T., KURTARAN, H. Application of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for surface roughness. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 170, n. 1-2, p. 11-16, 2005. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2005.04.096

OMRANI, Emad; MOGHADAM, Afsaneh Dorri; MENEZES, Pradeep L.; ROHATGI, Pradeep K. Influences of graphite reinforcement on the tribological properties of self-lubricating aluminum matrix composites for green tribology, sustainability, and energy efficiency – a review. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 83, n. 1-4, p. 325-346, 2016. DOI 10.1007/s00170-015-7528-x

PAIVA, Anderson P.; FERREIRA, João Roberto; BALESTRASSI, Pedro P. A multivariate hybrid approach applied to AISI 52100 hardened steel turning optimization. **Journal of**

Materials Processing Technology, v. 189, p. 26-35, 2007. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2006.12.047

PAIVA, A. P.; PAIVA, E. J.; FERREIRA, J. R.; BALESTRASSI, P. P.; COSTA, S. C. A multivariate mean square error optimization of AISI 52100 hardened steel turning. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 43, p. 631-643, 2009. DOI 10.1007/s00170-008-1745-5

PAKSERESHT, Amir Hossein; JAVADI, Amir Hossein; NEJATI, Mehrdad; SHIRVANIMOGHADDAM, Kamyar; GHASALI, Ehsan; TEIMOURI, Reza. Statistical analysis and multiobjective optimization of process parameters in plasma spraying of partially stabilized zirconia. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 75, n. 5-8, p. 739-753, 2014. DOI 10.1007/s00170-014-6169-9

PAKSERESHT, Amir Hossein; GHASALI, Ehsan; NEJATI, Mehrdad; SHIRVANIMOGHADDAM, Kamyar; JAVADI, Amir Hossein; TEIMOURI, Reza. Development empirical-intelligent relationship between plasma spray parameters and coating performance of Ytria-Stabilized Zirconia. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 76, n. 5-8, p. 1031-1045, 2015. DOI 10.1007/s00170-014-6212-x

PATEL, Manjunath G. C.; KRISHNA, Prasad; PARAPPAGOUDAR, Mahesh B. An intelligent system for squeeze casting process – soft computing based approach. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 86, n. 9, p. 3051-3065, 2016. DOI 10.1007/s00170-016-8416-8

PEARSON, Karl F.R.S. On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling. **Philosophical Magazine Series**, v. 5, n. 50, p. 157-175, 1900. DOI 10.1007/978-1-4612-4380-9_2

PEARSON, Karl F.R.S. On the Theory of Contingency and its Relation to Association and Normal Correlation. In: Drapers' Co. Memoirs, Biometric Series 1, Mathematical contributions to the theory of evolution. Dulau and Co: London, 1904.

PETERSON, John J.; KUHN, Andrew M. Ridge Analysis with Noise Variables. **Technometrics**, v. 47, n. 3, p. 274-283, 2005.

PLACKETT, R. L. Karl Pearson and the chi-squared test. **International Statistical Review**, v. 51, p. 59-72, 1983. DOI 10.2307/1402731

PRABHU, R.; ALWARSAMY, T. Effect of process parameters on ferrite number in cladding of 317L stainless steel by pulsed MIG welding. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 31, n. 3, p.1341-1347, 2017. DOI 10.1007/s12206-017-0234-x

PURKAYASTHA, Manashi Das; BARTHAKUR, Anasuya; MAHANTA, Charu Lata. Production of Vegetable Protein from Rapeseed Press-Cake Using Response Surface Methodology, Weighted Multivariate Index, and Desirability Function: A Way to Handle

Correlated Multiple Responses. **International Journal of Food Properties**, v. 18, p. 1248-1271, 2015. DOI 10.1080/10942912.2014.891612

RAO, Singiresu S. **Engineering optimization: theory and practice**. 4 ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.

RAJAKUMAR, S.; BALASUBRAMANIAN, V. Diffusion bonding of titanium and AA 7075 aluminum alloy dissimilar joints—process modeling and optimization using desirability approach. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 86, n. 1-4, p. 1095–1112, 2016. DOI 10.1007/s00170-015-8223-7

RAJESH, P.; NAGARAJU, U.; GOWD, G. Harinath; VARDHAN, T. Vishnu. Experimental and parametric studies of Nd:YAG laser drilling on austenitic stainless steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2015. DOI 10.1007/s00170-015-7639-4

RAMACHANDRAN, K. K.; MURUGAN, N.; KUMAR, S. Shashi. Performance analysis of dissimilar friction stir welded aluminium alloy AA5052 and HSLA steel butt joints using response surface method. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 86, n. 9-12, p. 2373–2392, 2016. DOI 10.1007/s00170-016-8337-6

ROCHA, Luiz C. S.; PAIVA, Anderson P.; PAIVA, Emerson J.; BALESTRASSI, Pedro P. Comparing DEA and principal component analysis in the multiobjective optimization of P-GMAW process. **Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, V. 38, p. 2513-2526, 2015. DOI 10.1007/s40430-015-0355-z

ROCHA, Luiz Célio Souza; PAIVA, Anderson Paulo de; ROTELA JUNIOR, Paulo; BALESTRASSI, Pedro Paulo; CAMPOS, Paulo Henrique da Silva. Robust multiple criteria decision making applied to optimization of AISI H13 hardened steel turning with PCBN wiper tool. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 89, n. 5-8, p. 2251–2268, 2017. DOI 10.1007/s00170-016-9250-8

ROSHAN, Babajanzade S.; JOOIBARI, Behboodi M.; TEIMOURI, R.; ASGHARZADEH-AHMADI, G.; FALAHATI-NAGHIBI, M.; SOHRABPOOR, H. Optimization of friction stir welding process of AA7075 aluminum alloy to achieve desirable mechanical properties using ANFIS models and simulated annealing algorithm. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 69, n. 5-8, p. 1803-1818, 2013. DOI 10.1007/s00170-013-5131-6

ROUTARA, Bharat Chandra; MOHANTY, Saumya Darsan; DATTA, Saurav; BANDYOPADHYAY, Asish; MAHAPATRA, Siba Sankar. Combined quality loss (CQL) concept in WPCA-based Taguchi philosophy for optimization of multiple surface quality characteristics of UNS C34000 brass in cylindrical grinding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 51, p. 135-143, 2010. DOI 10.1007/s00170-010-2599-1

RYAN, Thomas. **Estatística moderna para engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

SAFEEN, Wasif; HUSSAIN, Salman; WASIM, Ahmad; JAHANZAIB, Mirza; AZIZ, Haris; ABDALLA, Hassan. Predicting the tensile strength, impact toughness, and hardness of friction

stir-welded AA6061-T6 using response surface methodology. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 87, n. 5-8, p. 1765–1781, 2016. DOI 10.1007/s00170-016-8565-9

SALMASNIA, Ali; KAZEMZADEH, Reza Baradaran; SEYYED-ESFAHANI, Mirmehdi; HEJAZI, Taha Hossein. Multiple response surface optimization with correlated data. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 64, p. 841-855, 2013. DOI 10.1007/s00170-012-4056-9

SAMBUCINI, Valeria. Confidence regions for the stationary point of a quadratic response surface based on the asymptotic distribution of its MLE. **Statistics and Computing**, v. 22, n. 3, p. 739-751, 2012. DOI 10.1007/s11222-010-9202-3

ŠAPARAUSKAS, Jonas; ZAVADSKAS, Edmundas Kazimieras; TURSKIS, Zenonas. Selection of facade's alternatives of commercial and public buildings based on multiple criteria. **International Journal of Strategic Property Management**, v. 15, n. 2, p. 189–203, 2011. DOI 10.3846/1648715X.2011.586532

SHI, Hao; ZHANG, Ke; XU, Zhengyi; HUANG, Tianyu; FAN, Liwen; BAO, Weining. Applying statistical models optimize the process of multi-pass narrow-gap laser welding with filler wire. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 75, n. 1-4, p. 279–291, 2014. DOI 10.1007/s00170-014-6159-y

SIVARAOS; MILKEYA, K.R.; SAMSUDINA, A.R., DUBEYB, A.K., KIDDC, P. Comparison between Taguchi Method and Response Surface Methodology (RSM) in Modelling CO₂ Laser Machining. **Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering**, v. 8, n. 1, p. 35-42, 2014.

SONAWANE, Harshad A.; JOSHI, Suhas S. Modeling of machined surface quality in high-speed ball-end milling of Inconel-718 thin cantilevers. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 78, n. 9-12, p. 1751–1768, 2015. DOI 10.1007/s00170-014-6759-6

SONG, Xiaoxu; ZHANG, Meng; PEI, Z.J.; WANG, Donghai. Ultrasonic vibration-assisted pelleting of wheat straw: A predictive model for energy consumption using response surface methodology. **Ultrasonics**, v. 54, n. 1, p. 305 -311, 2014. DOI 10.1016/j.ultras.2013.06.013

STEWART, James. **Calculus**. 7 ed. Belmont: Cengage, 2012.

SUDHAGAR, S.; SAKTHIVEL, M.; MATHEW, PRINCE J.; DANIEL, S. Ajith Arul. A multi criteria decision making approach for process improvement in friction stir welding of aluminium alloy. **Measurement**, v. 108, p. 1-8, 2017. DOI 10.1016/j.measurement.2017.05.023

SUNDARARAMAN, K. A.; GUHARAJA, S.; PADMANABAN, K. P.; SABAREESWARAN, M. Design and optimization of machining fixture layout for end-milling operation. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 73, n. 5-8, p. 669–679, 2014. DOI 10.1007/s00170-014-5848-x

TEIMOURI, Reza; AMINI, Saeid; MOHAGHEGHIAN, Nasroodin. Experimental study and empirical analysis on effect of ultrasonic vibration during rotary turning of aluminum 7075 aerospace alloy. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 26, p. 1-17, 2017. DOI 10.1016/j.jmapro.2016.11.011

VADDE, K.K.; SYROTIUK, V.R.; MONTGOMERY, D.C. Optimizing protocol interaction using response surface methodology. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, v. 5, n. 6, p. 627-638, 2006. DOI 10.1109/TMC.2006.82

VARUN, A.; VENKAI AH, Nasina. Simultaneous optimization of WEDM responses using grey relational analysis coupled with genetic algorithm while machining EN 353. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 76, n. 1-4, p. 675–690, 2015. DOI 10.1007/s00170-014-6198-4

VERMA, Girish Chandra; KALA, Prateek; PANDEY, Pulak Mohan. Experimental investigations into internal magnetic abrasive finishing of pipes. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 88, n. 5-8, p. 1657–1668, 2017. DOI 10.1007/s00170-016-8881-0.

WINICZENKO, Radosław. Effect of friction welding parameters on the tensile strength and microstructural properties of dissimilar AISI 1020-ASTM A536 joints. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 84, n. 5-8, p. 1657–1668, 2016. DOI 10.1007/s00170-015-7751-5

XU, W. H.; LIN, S. B.; FAN, C. L.; ZHUO, X. Q.; YANG, C. L. Statistical modelling of weld bead geometry in oscillating arc narrow gap all-position GMA welding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 72, n. 9-12, p. 1705–1716, 2014. DOI 10.1007/s00170-014-5799-2

YILMAZ, Oguzhan; BOZDANA, A. Tolga; OKKA, M. Ali. An intelligent and automated system for electrical discharge drilling of aerospace alloys: Inconel 718 and Ti-6Al-4V. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 74, n. 9-12, p. 1323–1336, 2014. DOI 10.1007/s00170-014-6059-1

YUE, Zhongbo; HUANG, Chuanzhen; ZHU, Hongtao; WANG, Jun; YAO, Peng; LIU, ZengWen . Optimization of machining parameters in the abrasive waterjet turning of alumina ceramic based on the response surface methodology. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 71, n. 9-12, p. 2107–2114, 2014. DOI 10.1007/s00170-014-5624-y

YÜCEL, Yasin; GÖYCINCIK, Sezer. Optimization of ethanol production from spent tea waste by *Saccharomyces cerevisiae* using statistical experimental designs. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 5, p. 247-255, 2015. DOI 10.1007/s13399-014-0138-2

ZAVADSKAS, E. K.; TURSKIS, Z. A new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making. *Technological and Economic Development of Economy*, v. 16, n. 2, p. 159-172, 2010. DOI 10.3846/tede.2010.10

ZHANG, W. W.; CONG, S. Failure analysis of SUS304 sheet during hydro-bulging based on GTN ductile damage model. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 86, n. 1-4, p. 427–435, 2016. DOI 10.1007/s00170-015-8199-3

ZHANG, Peng; KOU, Shuqing; LIN, Baojun; WANG, Yumei. Optimization for radial knurling connection process of assembled camshaft using response surface method. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 77, n. 1-4, p. 653–661, 2015. DOI 10.1007/s00170-014-6486-z

ZHANG, W. W.; HAN, C.; YUAN, S. J. Optimization of pre-form shapes by response surface methodology for hydro-forming of 780 MPa torsion beam. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 85, n. 5-8, p. 1227–1237, 2016. DOI 10.1007/s00170-015-8043-9

ZHAO, Sheng; BI, Qingzhen; WANG, Yuhan; SHI, Jing. Empirical modeling for the effects of welding factors on tensile properties of bobbin tool friction stir-welded 2219-T87 aluminum alloy. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 90, n. 1-4, p. 1105–1118, 2017. DOI 10.1007/s00170-016-9450-2

ZHAO, Tao; SHI, Yaoyao; LIN, Xiaojun; DUAN, Jihao; SUN, Pengcheng; ZHANG, Jun. Surface roughness prediction and parameters optimization in grinding and polishing process for IBR of aero-engine. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 74, n. 5-8, p. 653–663, 2014. DOI 10.1007/s00170-014-6020-3

ZHOU, Yunguang; GONG, Yadong; ZHU, Zongxiao; GAO, Qi; WEN, Xuelong. Modelling and optimisation of surface roughness from microgrinding of nickel-based single crystal superalloy using the response surface methodology and genetic algorithm. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 85, n. 9-12, p. 2607–2622, 2016. DOI 10.1007/s00170-015-8121-z