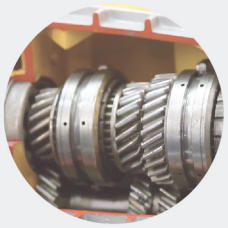
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

MESTRADO EM ENGENHARIA E GESTÃO INDUSTRIAL



APLICAÇÃO DO METODO DE TAGUCHI NA INDUSTRIA DE DISPOSITIVOS MÉDICOS

ÂNGELA ISABEL PEIXOTO PEREIRA

novembro de 2019

POLITÉCNICO
DO PORTO

Instituto Superior de Engenharia do Porto

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE TAGUCHI NA INDÚSTRIA DE DISPOSITIVOS MÉDICOS

Ângela Isabel Peixoto Pereira

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento Engenharia Mecânica

POLITÉCNICO
DO PORTO

Instituto Superior de Engenharia do Porto

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE TAGUCHI NA INDÚSTRIA DE DISPOSITIVOS MÉDICOS

Ângela Isabel Peixoto Pereira
1160307

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Gestão Industrial, realizada sob a orientação do Professor Doutor Manuel Pereira Lopes e coorientação do Eng. Eduardo Martins.

2019
Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento Engenharia Mecânica

POLITÉCNICO
DO PORTO

JÚRI

Presidente
Doutor António Galrão Ramos
Professor Adjunto, ISEP
Orientador
Doutor Manuel Pereira Lopes
Professor Adjunto, ISEP
Co-orientador
Eng. Eduardo Martins
Assintente Convidado, ISEP
Arguente
Doutora Carla Alexandra Soares Geraldes
Professor Adjunto, IPB

AGRADECIMENTOS

No culminar desta etapa académica não posso deixar de agradecer a todos que contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional.

Agradeço ao meu orientador académico, Doutor Manuel Pereira Lopes pelo acompanhamento realizado, mostrando-se sempre disponível. As suas contribuições foram essenciais para a realização deste trabalho.

Agradeço ao Eng. Eduardo Martins pela orientação científica fundamental para a progressão deste trabalho, a transmissão de conhecimentos e total disponibilidade.

Aos meus colegas de curso que me acompanharam durante todo o percurso académico.

Um agradecimento especial para a minha família.

A todos muito Obrigado!

PALAVRAS CHAVE
Método Taguchi, dispositivo médico, impregnação, parâmetros do processo.

RESUMO

A realização deste trabalho surge na fase de desenvolvimento do produto e processo numa empresa de dispositivos médicos, nomeadamente substituto ósseo.
A produção de substitutos ósseos apresenta elevados requisitos normativos e regulamentares, também o consumidor destes produtos apresenta elevados requisitos de qualidade.
Na fase de produções piloto detetou-se a existência de um problema de qualidade nos blocos de substituto ósseo. O trabalho apresentado foi desenvolvido em contexto real exigindo a compreensão do processo produtivo e do produto. Através de uma análise multidisciplinar permitiu direcionar o problema para o processo de impregnação. O processo de impregnação visa a introdução de uma suspensão de matérias primas, no interior da espuma de poliuretano. Para este processo revelou-se necessário analisar os parâmetros do processo e o seu efeito no problema de impregnação detetado. Em complemento ao estudo experimental foi desenvolvido o estudo R&R para o sistema de medição. O estudo R&R para os instrumentos de medição, paquímetro e balança evidencia que variabilidade do sistema de medição é desprezável em relação à variabilidade total do processo de impregnação.
O estudo do processo de impregnação foi desenvolvido de acordo com o DOE, através do método de Taguchi. Para a experiência realizada foram identificados seis fatores e uma interação alocados numa matriz L_8, num total de oito ensaios com apenas uma replicação e com seis unidades (lote mínimo para a produção) por cada ensaio. As respostas de qualidade identificadas para o estudo são a massa, do tipo Maior-é-Melhor, e a área, do tipo Menor-é-Melhor. A análise dos resultados foi desenvolvida através da análise gráfica e análise de variância para cada resposta da qualidade individualmente.
A análise de variância ANOVA foi desenvolvida em duas etapas distintas. Na fase inicial, para todas as observações do estudo. Na fase seguinte foi realizada a análise de variância para a razão S/R recorrendo ao *pooling up* dos fatores menos significativos. Para a e resposta de qualidade massa constatou-se como fatores significativos, a velocidade de impregnação, volume do frasco, tempo de impregnação e a interação relação PU/β-TCP e concentração de sólidos. Para a resposta área constatou-se como fatores significativos, a relação espuma PU/β-TCP, a concentração de sólidos na suspensão, a interação relação espuma PU/β-TCP e concentração de sólidos, o tempo de impregnação e o volume do frasco. No entanto, os resultados obtidos para ambas as respostas estudadas, a massa e a área, a variabilidade do processo é claramente superior ao efeito dos fatores significativos. Para trabalhos futuros recomenda-se a retirada dos fatores não significativos, adicionando novos fatores não incluídos no estudo realizado.

KEYWORDS
Taguchi method, medical device, impregnation, process parameters.

ABSTRACT

This work comes at the product and process development stage in a medical device company, namely bone substitute. The production of bone substitutes has high regulatory and regulatory requirements, also the consumer of these products has high quality requirements. In the pilot production phase, a quality problem was detected in the bone substitute blocks. The work presented was developed in a real context requiring an understanding of the production process and the product. Through a multidisciplinary analysis allowed to direct the problem to the impregnation process. The impregnation process aims to introduce a suspension of raw materials into the polyurethane foam. For this process it was necessary to analyse the process parameters and their effect on the impregnation problem detected. In addition to the experimental study, the R&R study for the measurement system was developed. The R&R study for measuring instruments, callipers and scales shows that the variability of the measuring system is negligible in relation to the total variability of the impregnation process.
The study of the impregnation process was developed according to the DOE through the Taguchi method. For the experiment, six factors and one interaction allocated in an L8 matrix were identified, in a total of eight single replication assays and six units (minimum production lot) per each assay. The quality responses identified for the study are the Greater-is-Best mass and the Smaller-is-Best area. Results analysis was developed through graphical analysis and analysis of variance for each quality response individually. The ANOVA analysis of variance was developed in two distinct steps. In the initial phase for all study observations. In the next phase, the analysis of variance for the S/R ratio was performed using the pooling up of the least significant factors. For the mass quality response, significant factors were: impregnation speed, flask volume, impregnation time and the interaction PU/β-TCP and solids concentration. For the area response it was found as significant factors: PU/β-TCP foam ratio, suspension solids concentration, PU/β-TCP foam interaction and solids concentration, impregnation time and flask volume. However, the results obtained for both the studied responses, the mass and the area, the process variability are clearly superior to the effect of the significant factors. For future work, the removal of non-significant factors is recommended, adding new factors not included in the study.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

Termo	Designação
ANOVA	*Analyses of Variance* - Análise de Variância
AO	Arranjo Ortogonal
β-TCP	Beta-trifosfato de cálcio
CE	Marcação CE
DM	Dispositivos Médicos
DOE	*Design of Experiments* – Desenho de Experiências
GL	Graus de liberdade
INFARMED	Autoridade de medicamento e produtos de saúde
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
QM	Soma quadrado médio
S/R	Sinal-Ruído
SQ	Soma dos Quadrados
SS_e	Soma erro quadrático
UE	União Europeia
PU	Poliuretano
R&R	Repetibilidade & Reprodutividade

Lista de Unidades

Termo	Designação
dB	Decibéis
g	Gramas
rpm	Rotações por minuto
µm	Mícrons
mm	Milímetros
min	Minutos
MPa	Mega Pascal
ppm	Parte por milhão

Lista de Símbolos

Símbolo	Designação
°C	Graus Celsius
%	Percentagem
∑	Somatório

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO 23

1.1 MOTIVAÇÃO 23

1.2 OBJETIVO 23

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO 24

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 27

2.1 DOE E O MÉTODO DE TAGUCHI 27

2.1.1 ENQUADRAMENTO HISTÓRICO 27

2.1.2 FUNDAMENTOS E CONCEITOS DO DESENHO DE EXPERIÊNCIAS 28

2.2 MÉTODO DE TAGUCHI 30

2.2.1 PROJETO ROBUSTO 31

2.2.2 FUNÇÃO PERDA 31

2.2.3 ARRANJOS ORTOGONAIS DA MATRIZ EXPERIMENTAL 34

2.2.4 INCLUSÃO DE FATORES DE RUÍDO NA EXPERIÊNCIA 37

2.3 ANÁLISE DE RESULTADOS 38

2.3.1 ANÁLISE GRÁFICA 39

2.3.2 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) 41

2.3.3 RAZÃO SINAL-RUÍDO 48

2.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE TAGUCHI 49

2.5 DISPOSITIVOS MÉDICOS 50

2.6 DESENVOLVIMENTO E PRODUÇÃO DE DISPOSITIVOS MÉDICOS 53

3 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO 57

3.1 PRODUTO 57

3.2 PROCESSO PRODUTIVO 58

3.3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA 61

3.4 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO – MÉTODO DE TAGUCHI 62

3.4.1 CLASSIFICAÇÃO DO TIPO DE RESPOSTA 63

3.4.2 SELEÇÃO DOS NÍVEIS DOS FATORES E INTERAÇÕES 63

3.4.3 ESCOLHA DA MATRIZ ORTOGONAL 64

3.5 REALIZAÇÃO DA EXPERIÊNCIA 65

3.6 RESULTADOS 66

3.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS 67

3.7.1 GAGE R&R 67

3.7.2 ANÁLISE RESULTADOS EXPERIMENTAIS 69

3.7.3 SINTESE DOS RESULTADOS 79

4 CONCLUSÕES 83

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO 87

6 ANEXOS 91
ANEXO A – ARRANJOS ORTOGONAIS E GRAFOS LINEARES 91
ANEXO B – TABELA F 95
ANEXO C – DIAGRAMA ISHIKAWA 96
ANEXO D – DADOS GAGE R&R 97

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – MODELO DE UM PROCESSO OU SISTEMA PRODUTIVO (ADAPTADO) (MONTGOMERY, 2017) .29
FIGURA 2 - GRÁFICO DA FUNÇÃO PERDA (ADAPTADO) (ROSS, 1996) 32
FIGURA 3 – GRÁFICO DA FUNÇÃO PERDA PARA CARATERÍSTICAS MENOR É MELHOR (ADAPTADO) (ROSS, 1996) 33
FIGURA 4 – GRÁFICO DA FUNÇÃO PERDA PARA CARATERÍSTICAS MAIOR É MELHOR (ADAPTADO) (ROSS, 1996) 33
FIGURA 5 – DIAGRAMA ISHIKAWA 34
FIGURA 6 – GRAFOS LINEARES AO L_8 (ADAPTADO) (ROSS, 1996) 36
FIGURA 7 – MATRIZ INTERNA E MATRIZ EXTERNA (ADAPTADO) (PEREIRA & REQUEIJO, 2012).....38
FIGURA 8 – GRÁFICO DO EFEITO MÉDIO DOS FATORES (ADAPTADO) (KRISHNAIAH & SHAHABUDEEN, 2012) 40
FIGURA 9 – GRÁFICO DO EFEITO MÉDIO DOS FATORES.....46
FIGURA 10 - DIFERENTES TAMANHOS DE BLOCOS E GRÂNULOS DE SUBSTITUTOS ÓSSEOS (NARAYAN, 2009) 58
FIGURA 11 – PROCESSO PRODUTIVO DO SUBSTITUTO ÓSSEO EM ESTUDO.....59
FIGURA 12 – SUSPENSÃO DE B-TCP.....59
FIGURA 13 – MISTURA E HOMOGENEIZAÇÃO.....59
FIGURA 14 –IMPREGNAÇÃO.....60
FIGURA 15 – SECAGEM.....60
FIGURA 16 – SINTERIZAÇÃO 60
FIGURA 17 – BLOCOS COM VAZIOS NO INTERIOR.....61
FIGURA 18 – ISHIKAWA PARA O PROBLEMA DE “VAZIO” NO INTERIOR DO BLOCO 62
FIGURA 19 – GRAFOS LINEAR L_8 65
FIGURA 20 – BALANÇA SARTORIUS 67
FIGURA 21 – GAGE R&R PARA A MEDIÇÃO 68
FIGURA 22 – PAQUÍMETRO 68
FIGURA 23 – GAGE R&R PARA A MEDIÇÃO 69
FIGURA 24 – EFEITOS MÉDIOS DOS FATORES 70
FIGURA 25 – INTERAÇÃO AB DA MASSA 71
FIGURA 26 – EFEITO DA MASSA, ENSAIO VS OBSERVAÇÕES.....72
FIGURA 27 – EFEITO DO S/R DOS FATORES.....73
FIGURA 28 – GRÁFICO PARETO PARA EFEITO DOS FATORES 74
FIGURA 29 – EFEITOS MÉDIOS DOS FATORES 75
FIGURA 30 – INTERAÇÃO AB ÁREA.....76
FIGURA 31 – EFEITO DA ÁREA OBSERVAÇÕES VS ENSAIOS.....77
FIGURA 32 – EFEITOS DO S/R DOS FATORES (ÁREA) 78
FIGURA 33 – GRÁFICO PARETO PARA EFEITO DOS FATORES 79
FIGURA 34 – GRAFO LINEAR L4 93
FIGURA 35 – GRAFO LINEAR L_8 93
FIGURA 36 – GRAFO LINEAR L_{12}.....94
FIGURA 37 – GRAFO LINEAR L_{16}.....94

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – MATRIZ FATORIAL COMPLETA COM 7 FATORES E 2 NÍVEIS (ADAPTADO) (ROY, 2010) 29
TABELA 2 – ETAPAS DO DOE (ADAPTADO) (ROSS, 1996) 30
TABELA 3 – MATRIZES ORTOGONAIS PARA DIFERENTES NÍVEIS E FATORES DE ESTUDO (ADAPTADO) (ROY, 2010) 35
TABELA 4 – MATRIZ L_8 (ADAPTADO) (ROY, 2010) 35
TABELA 5 – INTERAÇÕES NA MATRIZ L_8 (ADAPTADO) (ROY, 2010) 36
TABELA 6 – MATRIZ ORTOGONAL L_8 COM 6 FATORES E 1 INTERAÇÃO (ADAPTADO) (ROY, 2010) 36
TABELA 7 – MATRIZ ORTOGONAL L_8 COM 4 FATORES E 3 INTERAÇÕES (ADAPTADO) (ROY, 2010) 37
TABELA 8 – MATRIZ ORTOGONAL L9 COM 4 FATORES E 3 NÍVEIS (ADAPTADO) (ROY, 2010) 37
TABELA 9 – MATRIZ L_8 COM RESPOSTAS DE DUAS REPLICAÇÕES (ADAPTADO) (KRISHNAIAH & SHAHABUDEEN, 2012) 39
TABELA 10 – RESPOSTAS DE NÍVEL 1 E 2 PARA CADA FATOR (ADAPTADO) (KRISHNAIAH & SHAHABUDEEN, 2012) 39
TABELA 11 – EFEITO MÉDIO DA RESPOSTA E RANKING DO EFEITO DOS FATORES (ADAPTADO) (KRISHNAIAH & SHAHABUDEEN, 2012) 40
TABELA 12 – TABELA ANOVA 42
TABELA 13 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA – ANOVA (ADAPTADO) (KRISHNAIAH & SHAHABUDEEN, 2012) 44
TABELA 14 – MATRIZ L8 COM INTERAÇÕES DE FATORES (ADAPTADO) (KRISHNAIAH & SHAHABUDEEN, 2012) 45
TABELA 15 – RESPOSTAS DE NÍVEL 1 E 2 PARA CADA FATOR (ADAPTADO) (KRISHNAIAH & SHAHABUDEEN, 2012) 45
TABELA 16 – EFEITO MÉDIO DA RESPOSTA E RANKING DO EFEITO DOS FATORES (ADAPTADO) (KRISHNAIAH & SHAHABUDEEN, 2012) 45
TABELA 17 – ABERTURA DA INTERAÇÃO DOS FATORES A E D (ADAPTADO) (KRISHNAIAH & SHAHABUDEEN, 2012) 46
TABELA 18 – TABELA ANOVA (ADAPTADO) (KRISHNAIAH & SHAHABUDEEN, 2012) 47
TABELA 19 – TABELA ANOVA COM *POOLING* DE FATORES(ADAPTO) (KRISHNAIAH & SHAHABUDEEN, 2012) 48
TABELA 20 – CRITÉRIOS DO SUBSTITUTO ÓSSEO (ADAPTADO) (ISO 13779, 2018) 58
TABELA 21 – NÍVEIS DOS FATORES 63
TABELA 22 – MATRIZ L_8 64
TABELA 23 – ALOCAÇÃO DOS FATORES À MATRIZ L_8 65
TABELA 24 – MATRIZ L8 COM ALOCAÇÃO DE FATORES, NÍVEIS E SEQUÊNCIA DOS ENSAIOS 65
TABELA 25 – RESPOSTA PARA A MASSA 66
TABELA 26 – RESPOSTA PARA A ÁREA 66
TABELA 27 – RESULTADOS GAGE R&R 67
TABELA 28 – RESULTADOS GAGE R&R 68
TABELA 29 – RESPOSTAS PARA AS MÉDIAS DA MASSA 70
TABELA 30 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA OS RESULTADOS DA MASSA 71
TABELA 31 – RESPOSTAS SINAL-RUÍDO DA MASSA DO TIPO MAIOR É MELHOR 72
TABELA 32 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA *POOLING UP* S/R PARA A MASSA 73

TABELA 33 – RESPOSTAS PARA AS MÉDIAS DA ÁREA 75
TABELA 34 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA A RESPOSTA ÁREA 76
TABELA 35 – RESPOSTAS SINAL-RUÍDO DA ÁREA DO TIPO MENOR É MELHOR 77
TABELA 36 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA *POOLING UP* S/R PARA A ÁREA 78
TABELA 37 – MATRIZ L_4 91
TABELA 38 – MATRIZ L_8 91
TABELA 39 – MATRIZ L_{12} 91
TABELA 40 – MATRIZ L_{16} 92
TABELA 41 – MATRIZ L_9 92
TABELA 42 – MATRIZ L_{27} 92
TABELA 43 – TABELA F NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA 10% 95
TABELA 44 – TABELA F NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA 5% 95
TABELA 45 – DADOS MEDIÇÃO R&R 97

INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO
1.2 OBJETIVO
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

1 INTRODUÇÃO

Este projeto apresenta o trabalho desenvolvido numa empresa de dispositivos médicos. Surge num contexto de elevada exigência para a empresa, de mudanças estruturais e estratégicas. A empresa após décadas na distribuição de dipositivos médicos na área da ortopedia avança para a produção de dispositivos médicos, mais especificamente, substitutos ósseos. Este projeto decorre numa fase de desenvolvimento do produto e do processo produtivo, anterior à produção e comercialização do produto.

Por motivos de confidencialidade a informação apresentada está restrita apenas ao essencial para o desenvolvimento do estudo.

1.1 MOTIVAÇÃO

No contexto atual as organizações estão atentas e reativas às necessidades dos clientes, esta posição no mercado global exige a produção com menor tempo, custos e recursos possíveis mantendo elevados níveis de qualidade. A capacidade de adaptação e qualidade dos produtos é assegurada através da aplicação de inúmeras ferramentas e métodos. O método de Taguchi alinha-se como um método aplicado na engenharia da qualidade e, embora tenha sido desenvolvido para aplicações em contexto industrial, é atualmente aplicado a diversas áreas científicas.

A indústria de dispositivos médicos, no contexto particular, a produção de substitutos ósseos, encontra-se sob elevado controlo legislativo e normativo. No entanto, a qualidade dos produtos é também essencial à sobrevivência das empresas produtoras. Neste sentido a aplicação do método de Taguchi mostra-se essencial na melhoria da qualidade dos produtos. Neste projeto a aplicação do método de Taguchi surge numa fase de desenvolvimento do produto e processo. A realização de produções piloto do produto revelaram problemas de qualidade. O substituto ósseo deve apresentar uma forma geométrica retangular e porosidade uniforme. No entanto, verificou-se a existência de um “vazio” no interior do substituto ósseo, constituindo um problema de qualidade do produto. A análise ao processo produtivo revelou que este problema estava associado ao processo de impregnação. Através deste projeto é realizado um estudo ao processo de impregnação e são obtidos resultados essenciais para o desenvolvimento do processo produtivo, uma vez que, a empresa não possuía dados sobre o desempenho do processo de impregnação.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo o estudo do processo produtivo do substituto ósseo, especificamente o processo de impregnação. Pretende-se estudar o efeito dos parâmetros do processo de impregnação no problema de qualidade “vazio”.

Assim para alcançar o objetivo traçado são desenvolvidos os seguintes elementos:

- Definir e delimitar o problema em análise;
- Estudar os parâmetros do processo de impregnação;
- Aplicação do método de Taguchi ao problema e processo em estudo.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho encontra-se dividido em 4 capítulos:

Capítulo 1: Introdução
No primeiro capítulo apresenta um enquadramento geral do trabalho desenvolvido ao longo deste relatório bem como os objetivos traçados, motivação e a estrutura do presente relatório.

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica
No segundo capítulo é realizada uma revisão bibliográfica, focada nos conceitos científicos que sustentam o desenvolvimento do trabalho realizado. Particularmente no método de Taguchi e dispositivos médicos.

Capítulo 3: Desenvolvimento do estudo
No terceiro capítulo são descritos o processo produtivo e o produto em estudo. Define-se o problema em estudo e desenvolve-se a aplicação do método de Taguchi, a realização da experiência e análise dos resultados obtidos.

Capítulo 4: Conclusões
No quarto capítulo são apresentadas as conclusões para o trabalho desenvolvido, assim como considerações sobre trabalhos futuros para complementar o estudo efetuado.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DOE E O MÉTODO DE TAGUCHI
2.1.1 ENQUADRAMENTO HISTÓRICO
2.1.2 FUNDAMENTOS E CONCEITOS DO DESENHO DE EXPERIÊNCIAS
2.2 MÉTODO DE TAGUCHI
2.2.1 PROJETO ROBUSTO
2.2.2 FUNÇÃO PERDA
2.2.3 ARRANJOS ORTOGONAIS DA MATRIZ EXPERIMENTAL
2.2.4 INCLUSÃO DE FATORES DE RUÍDO NA EXPERIÊNCIA
2.3 ANÁLISE DE RESULTADOS
2.3.1 ANÁLISE GRÁFICA
2.3.2 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)
2.3.3 RAZÃO SINAL-RUÍDO
2.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE TAGUCHI
2.5 DISPOSITIVOS MÉDICOS
2.6 DESENVOLVIMENTO E PRODUÇÃO DE DISPOSITIVOS MÉDICOS

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo realiza-se a revisão bibliográfica da metodologia científica que fundamenta o desenvolvimento deste estudo. Aborda-se a metodologia do desenho de experiências, o método de Taguchi e os dispositivos médicos.

2.1 DOE E O MÉTODO DE TAGUCHI

O desenho de experiências, também designado por DOE, abreviatura para o termo anglo-saxónico *Design Of Experiments*, é um método que testa um conjunto de alterações planeadas nas variáveis de entrada de um processo com o objetivo de identificar o seu impacto na resposta do processo (Montgomery, 2017).

O método de Taguchi consiste num método de desenho de experiências fatorais fracionadas. Ou seja, apenas uma parte das combinações possíveis é executada. Genichi Taguchi propôs a execução de uma parte das combinações possíveis através da aplicação de matrizes ortogonais, definindo assim as combinações a aplicar na execução da experiência (Roy, 2010).

2.1.1 ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

Genichi Taguchi introduziu um conjunto de novos conceitos estatísticos com importante aplicação na engenharia da qualidade. No período pós 2ª Guerra Mundial, no Japão, a qualidade dos sistemas telefónicos mostrava-se insuficiente. Para elevar a qualidade deste sistema foi criado um centro de investigação, *Electrical Communication Laboratories*, semelhante aos Laboratórios Bell. Taguchi assume a responsabilidade da produção e qualidade do centro de investigação. Ele verifica a aplicação de recursos avultados na fase experimental e de testes e por outro lado, pouca sistematização em melhoria desta fase. Taguchi começa por desenvolver técnicas de otimização experimental, desenvolvendo uma nova perspetiva da qualidade (Roy, 2010).
Segundo Taguchi "*A Qualidade de um produto determina-se pela perda económica imposta à sociedade a partir do momento em que o produto está para ser distribuído*" (Requeijo & Pereira, 2012).
Para minimizar esta perda, Taguchi considera necessário fabricar produtos insensíveis, ou robustos, a ruídos provocados pelos fatores não controláveis que afetam o desempenho dos processos (Requeijo & Pereira, 2012).
O autor defende uma abordagem integrada para a conceção e desenvolvimento de processos e produtos robustos, esta abordagem é designada por controlo de qualidade *off-line*.
O conceito desenvolvido por Taguchi atinge especial ênfase nos anos 80 do século XX, atualmente o método de Taguchi é mundialmente aplicado em várias áreas científicas com grande sucesso, melhorando a qualidade de produtos e processos. Surge também alguma controvérsia no que respeita à modelação matemática, no entanto, o método permitiu aumentos de qualidade significativos.

A aplicação do método de Taguchi permite parametrizar a qualidade de um produto ou processo com o recurso ao planeamento de experiências. Este método enquadra-se no método *off-line* de qualidade. Ou seja, o esforço para melhorar a qualidade é desenvolvido antes da produção, na fase de testes (Roy, 2010).

2.1.2 FUNDAMENTOS E CONCEITOS DO DESENHO DE EXPERIÊNCIAS

O desenho de experiências constitui uma poderosa ferramenta de melhoria dos processos e produtos. A redução sistemática da variabilidade permite a conceção de produtos e processos robustos com baixa influência de fatores de ruído externos, satisfazendo diversas partes interessadas numa organização.
Tradicionalmente no planeamento da experiência o investigador fazia variar um fator de cada vez. Desta forma a variação de um fator e manutenção dos restantes permitia verificar a influência desse fator na caraterística de qualidade em estudo. Nos meados dos anos 20 e 30 do século passado Fisher desenvolveu, na *Agicultural Experimental Station*, uma teoria científica baseada na experimentação. A aplicação de métodos algébricos e estatísticos e estudos também desenvolvidos por outros autores como Montgomery, G. Box, J. Turkey, D. Cox, entre outros, contribuíram para a difusão do DOE.
No DOE são usados alguns conceitos que importa enumerar (Requeijo & Pereira, 2012):

Experiência ou ensaio – teste no qual se efetuam alterações de determinadas variáveis ou parâmetros do processo para observar as mudanças que ocorrem na caraterística da unidade experimental. A unidade experimental consiste na entidade na qual são feitas as medições de uma ou mais caraterísticas.

Fatores controláveis – correspondem aos fatores que podem ser alterados e definidos durante a execução da experiência. Estes fatores podem ser categorizados em qualitativos, como o operador da máquina, máquina utilizada, ou quantitativo, como a tempo de rotação, velocidade de rotação entre outros.

Fatores não controláveis – correspondem aos fatores que não são controlados, sofrem alteração natural e influenciam a resposta da experiência. Estes fatores podem ser as condições climatéricas não controladas durante a execução da experiência (temperatura e humidade).

Variáveis de resposta – corresponde às variáveis resultantes do sistema que são determinadas pela entrada de fatores controláveis e não controláveis.

Níveis de fatores – correspondem ao nível de cada fator, de acordo com a intensidade, para a realização da experiência.

Replicação – é a repetição de uma experiência em condições análogas. As réplicas não são os valores de uma resposta medidos numa mesma experiência, mas os valores obtidos por replicação dessa experiência.

Realização aleatória – a realização experimental deve ser efetuada de forma aleatória garantindo que as observações correspondem a variáveis aleatórias independentes. Montgomery (2017) representa um modelo de um processo ou sistema, Figura 1.

O processo produtivo é constituído por fatores de entrada controláveis (x_1, x_2, …, x_n), que são processados de acordo com parâmetros definidos e ajustáveis como por exemplo, temperatura, pressão velocidade de corte, etc.. Os fatores de entrada incontroláveis ou de difícil controlo (z_1, z_2, …, z_n) como por exemplo fatores ambientais, propriedades de matérias-primas fornecidas externamente. O processo produtivo permite a transformação de matérias primas em produtos acabados, com diferentes caraterísticas de qualidade. A caraterística de saída corresponde à caraterística de qualidade que é medida do processo (Montgomery, 2017).

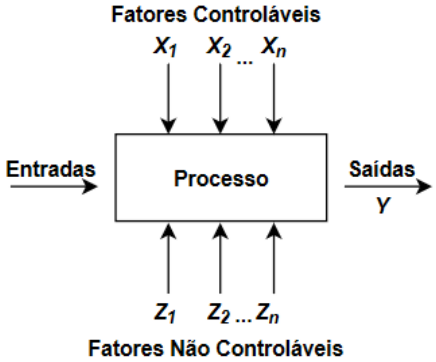


Figura 1 – Modelo de um processo ou sistema produtivo (adaptado) (Montgomery, 2017)

O planeamento fatorial completo permite o estudo de todas as combinações possíveis entre os níveis e fatores em estudo. O número de ensaios necessários para o estudo depende do número de fatores e de níveis. Ou seja, num estudo para sete fatores a dois níveis são possíveis 128 combinações diferentes, neste método todas as combinações são estudadas, Tabela 1.

Tabela 1 – Matriz fatorial completa com 7 fatores e 2 níveis (adaptado) (Roy, 2010)

	A	B	C	D	E	F	G
1	2	1	2	1	2	2	1
2	2	2	2	2	1	2	2
3	2	2	2	1	2	2	1
4	1	1	1	2	1	2	2
…	…	…	…	…	…	…	…
126	1	1	1	2	2	1	2
127	2	2	2	2	2	1	1
128	2	1	2	1	2	2	2

Este método pode implicar um elevado número de ensaios e consequentemente elevado custo. Para determinado número de fatores e níveis a realização dos ensaios torna-se impraticável.
Esta técnica requer um elevado número de experiências. Ou seja, quando analisados fatores de dois níveis, o número de experiências pode ser representado por $r \times 2^k$. Onde *r* representa o número de réplicas e *k* o número de fatores a considerar. Na perspetiva de minimizar o número de experiências surgiu o planeamento fatorial fracionado. No método de Taguchi, não há interesse nos resultados isolados de uma determinada combinação, mas na variação média da resposta ao longo de um certo número de experiências. Neste método, apesar de não se usar uma matriz completa, é possível estudar todas as combinações de fatores através do recurso de matrizes ortogonais. As matrizes designam-se de L_n onde *n* corresponde ao número de ensaios. Ou seja, a uma matriz L_9 corresponde a uma matriz com 9 ensaios.
A aplicação da metodologia de Taguchi requer uma abordagem sistemática com o objetivo de obter resultados consistentes. O desenho de experiências através do método de Taguchi obedece ao planeamento de experiências DOE. Esta metodologia divide-se em três momentos fundamentais (Tabela 2): planeamento, execução e análise (Ross, 1996).

Tabela 2 – Etapas do DOE (adaptado) (Ross, 1996)

	Etapas do DOE
Planeamento	1. Caraterização do problema; 2. Definição do objetivo da experiência; 3. Definição das características pretendidas; 4. Identificação dos fatores de controlo que devem influenciar essas características; 5. Identificação dos fatores de ruído; 6. Escolha dos níveis dos fatores; 7. Seleção da matriz ortogonal adequada; 8. Seleção das interações que podem influenciar as características;
Execução	9. Execução das experiências;
Análise	10. Análise e interpretação dos resultados; 11. Realização da experiência de confirmação.

Outros autores defendem também uma abordagem sistemática do desenho de experiências, no entanto apresentam metodologias com fases distintas. Peace (1993) referência as fases do desenho experimental nas seguintes fases: planeamento, desenho, execução e análise.

2.2 MÉTODO DE TAGUCHI

Taguchi desenvolveu um método para aplicação de DOE em contexto industrial, reduzindo e simplificando as experiências fatoriais. Segundo Roy (2010), Taguchi apresenta uma nova

abordagem para o desenho de experiências, orientado para a aplicação industrial enfatizando:

1. Estratégia do Projeto Robusto
2. Função Perda
3. Arranjo Ortogonal da matriz de experimental
4. Análise Sinal-Ruído

2.2.1 PROJETO ROBUSTO

Para alcançar a robustez de um produto a qualidade deve ser planeada desde a fase de projeto do produto e continuar nas fases de produção e fabricação. Durante estas fases devem ser desenvolvidas as seguintes etapas (Taguchi, 1990):

Projeto do sistema – nesta fase desenvolve-se um protótipo básico que desempenha as funções desejadas para o produto com o desvio mínimo de valores nominais de desempenho. O projeto de sistema determina processos industriais necessários para a execução das várias etapas produtivas.

Projeto de parâmetros – esta fase surge depois de estabelecido o projeto do sistema, e permite estabelecer os parâmetros ótimos para a cada elemento do sistema, diminuindo os desvios funcionais do produto. A determinação dos níveis ótimos dos parâmetros, são obtidos através dos métodos de experimentação. Nesta fase do projeto são determinadas as combinações ótimas para os parâmetros e níveis de todos os componentes do produto. O projeto de parâmetros, na perspetiva da produção, determina níveis operacionais dos processos industriais minimizando a variação dos parâmetros.

Projeto de tolerâncias – nesta fase do projeto é determinada a tolerância individual de cada parâmetro, sendo estabelecido a relação de perda da qualidade-custo. Assim, nesta fase determina-se as amplitudes ótimas para as condições operacionais que minimizem o custo total da variação do produto.

2.2.2 FUNÇÃO PERDA

A função perda da qualidade desenvolvida por Taguchi tem como objetivo determinar a perda económica resultante da qualidade de um produto. A perda ocorre quando uma característica funcional da qualidade de um produto se afasta do valor nominal ótimo. Para cada caraterística de qualidade pode ser definida uma função que representa a perda económica e o desvio relativamente ao valor ótimo. No entanto, outros fatores como o tempo e recursos necessários para determinar essas relações tornam-se impraticáveis. Assim, Taguchi apresenta a função quadrática como o modelo mais ajustado para o cálculo da perda de qualidade dos produtos (Ealey, 1994).
A avaliação do nível da qualidade dos produtos recorrendo à função perda para as seguintes tolerâncias:

a) **O valor nominal é melhor** – as caraterísticas da qualidade cuja tolerância nominal é exigida apresentam um valor nominal como valor ótimo. Este tipo de tolerância é requisito para muitos produtos, peças, elementos e componentes quando um tamanho (ou caraterística) nominal é preferível. Caraterísticas como a dimensão, folga, viscosidade, cor, composição química são exemplo de nominal é melhor (Taguchi, 1990).

O afastamento entre as caraterísticas do produto e o valor alvo representa-se por:

$$L = K(y - m)^2 \text{ onde, } K = \frac{A_0}{\Delta_0^2}$$

L corresponde ao custo da perda, *y* ao valor verificado para as caraterísticas do produto, *m* ao valor alvo para as caraterísticas. *K* representa uma constante de proporcionalidade, a perda para o consumidor (A_0) representa a perda média quando o desvio da caraterística excede a tolerância funcional, resultando no custo médio para o consumidor em substituir, reparar o produto, bem como a insatisfação com o produto. A estes valores podem ainda ser adicionados outros custos, como o tempo de espera, tempo de espera com substituição/reparação, tempo de espera com a impossibilidade de uso do produto. A tolerância funcional (Δ_0) representa o valor máximo admissível de desvio para uma caraterística da qualidade para o consumidor (Taguchi, 1990). Graficamente a função perda apresenta-se na Figura 2.

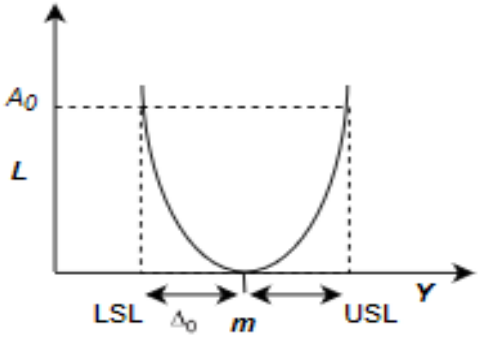


Figura 2 - Gráfico da Função Perda (adaptado) (Ross, 1996)

A Figura 2 apresenta no eixo das abcissas o valor alvo (*m*), a tolerância funcional (Δ_0) em ambos os sentidos, estabelecendo os limites de qualidade superior (USL) e inferior (LSL), para a caraterística de qualidade, *Y*. Atingido o valor alvo, a perda corresponde a zero (*L*=0). O desvio do valor alvo aumenta a perda em ambos os sentidos, atingindo o valor máximo no limite da tolerância funcional. A perda para o consumidor (A_0) é incorrida quando o valor da característica de qualidade coincide com o limite de qualidade superior (ULS) ou inferior (LLS)(Ross, 1996).

b) **O menor valor é melhor** – as caraterísticas de qualidade do tipo "quanto menor melhor" apresentam valores não-negativos, cujo valor ótimo corresponde a zero. São exemplos deste tipo de caraterística o nível de desgaste, deterioração, impurezas, contaminação. A função perda das caraterísticas do tipo menor é melhor com a especificação em zero calcula-se através da equação:

$$L = Ky^2 \text{ onde, } K = \frac{A_0}{\Delta_0^2}$$

Em que *L* representa a perda, *y* o valor observado para as caraterísticas e *k* a constante de proporcionalidade.

O gráfico da Figura 3 apresenta a função perda (*L*) para caraterísticas da qualidade do tipo menor é melhor. A perda atinge o valor mínimo (*L*=0) quando a valor da caraterística de qualidade é zero (*y*=0). A perda aumenta à medida que a tolerância funcional aumenta. A perda para o consumidor é incorrida quando o valor da característica de qualidade assume o limite superior de qualidade (USL).

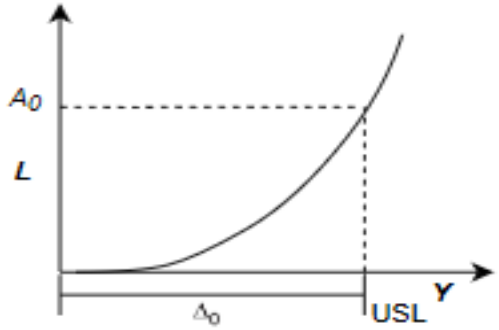


Figura 3 – Gráfico da função perda para caraterísticas menor é melhor (adaptado) (Ross, 1996)

c) **O maior é melhor** – as caraterísticas de qualidade do tipo "quanto maior é melhor" correspondem a caraterísticas funcionais que apresentam o maior valor possível, como ótimo. Um exemplo destas caraterísticas são a resistência mecânica, rendimento dos combustíveis (Taguchi, 1990). Para caraterísticas da qualidade do tipo maior é melhor a equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$L = K\frac{1}{y^2} \text{ onde, } K = \frac{A_0}{\Delta_0^2}$$

Em que *L* representa a perda, *y* o valor observado para as caraterísticas e *k* a constante de proporcionalidade.

O gráfico da Figura 4 apresenta a função perda para caraterísticas da qualidade do tipo maior é melhor. A perda atinge o valor máximo quando a valor da caraterística de qualidade é o menor possível (*y*=0). A perda para o consumidor é incorrida quando o valor da característica de qualidade assume o limite inferior de qualidade (LSL).

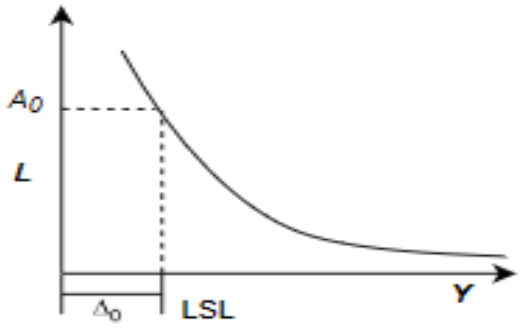


Figura 4 – Gráfico da função perda para caraterísticas maior é melhor (adaptado) (Ross, 1996)

2.2.3 ARRANJOS ORTOGONAIS DA MATRIZ EXPERIMENTAL

A execução de experiências na indústria com muitos fatores e custos avultados, tornam o planeamento fatorial completo impraticável. Taguchi desenvolveu experiências fatorais fracionadas de arranjo ortogonal que permitem a realização de um menor número de experiências para um determinado número de fatores (Roy, 2010).

A aplicação de uma matriz de AO é precedida de uma análise do problema em estudo. Nesta fase define-se objetivamente o problema em estudo, a resposta e caraterística da qualidade. A determinação dos fatores envolvidos no problema em estudo pode ser realizado através da constituição de uma equipa multidisciplinar recorrendo a ferramentas como o brainstorming e diagrama de Ishikawa, Figura 5 (Roy, 2010).

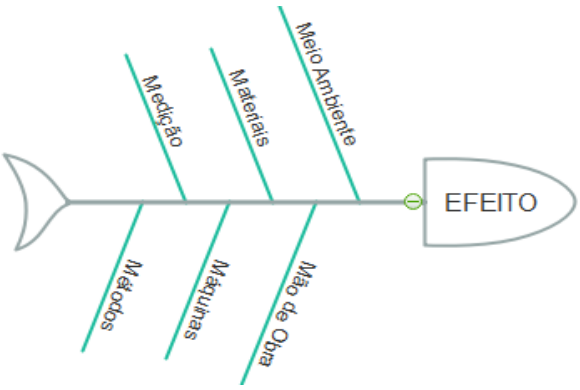


Figura 5 – Diagrama Ishikawa

A definição de fatores constitui uma etapa importante, pois a seleção ou omissão de fatores no estudo pode conduzir a conclusões erradas ou imprecisas. Os fatores selecionados para a realização da experiência devem apresentar elevada influência na resposta e serem controláveis em ambiente industrial (Roy, 2010).
Os níveis de estudo para os fatores selecionados devem ser numa fase inicial dois, exequíveis em ambiente industrial e próximos dos valores atuais (Peace, 1993).

Taguchi propôs a utilização de experiências fatorais fracionadas através da aplicação de matrizes ortogonais normalizadas. Estas matrizes normalizadas permitem a aplicação para diferente número de fatores e ensaios. Uma matriz classifica-se de ortogonal quando se verifica que cada coluna é estatisticamente independente, no âmbito da experimentação de uma forma geral são utilizadas matrizes com dois ou três níveis para todos os fatores. As matrizes mais usuais para fatores com dois níveis são L_8, L_{12} e L_{16}. Para matrizes de três níveis são utilizados frequentemente as matrizes L_9 e L_{27}. Apesar de utilização menos frequente, é possível a utilização de matrizes ortogonais cujos fatores apresentem diferentes níveis. Por exemplo, a matriz L_{36} permite o estudo de 23 fatores, dois quais 11 com a atribuição de 2 níveis e 12 fatores com a atribuição de 3 níveis.
A Tabela 3, apresenta matrizes ortogonais para diferentes níveis e fatores de estudo.

Tabela 3 – Matrizes Ortogonais para diferentes níveis e fatores de estudo (adaptado) (Roy, 2010)

Matrizes Ortogonais	Nº de ensaios	Nº Máximo de fatores de controlo	Nº Máximo de colunas por nível			
			2	3	4	5
L_4	4	3	3	-	-	-
L_8	8	7	7	-	-	-
L_9	9	4	-	4	-	-
L_{12}	12	11	11	-	-	-
L_{16}	16	15	15	-	-	-
L_{18}	18	8	1	7	-	-
L_{25}	25	6	-	-	-	6
L_{27}	27	13	-	13	-	-
L_{32}	32	31	31	-	-	-
L_{32}	32	10	1	-	9	-
L_{36}	36	23	11	12	-	-
L_{50}	50	12	1	-	-	11
L_{54}	54	26	1	25	-	-
L_{64}	64	63	63	-	-	-
L_{64}	64	21	-	-	21	-
L_{81}	81	40	-	40	-	-

No método de Taguchi os níveis, baixo e alto são designados por 1 e 2 (ou nos casos de 3 níveis, 1, 2 e 3). A matriz L_8 permite a alocação de sete fatores com 2 níveis (1 para o nível inferior e 2 para o nível superior). A Tabela 4 apresenta a alocação de fatores e níveis para a matriz L_8 (Anexo A).

Tabela 4 – Matriz L_8 (adaptado) (Roy, 2010)

Ensaio	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

No entanto, em algumas experiências os fatores apresentam interações entre si afetando o valor de resposta, ou seja, o valor de um fator repercute-se no efeito do outro. A

indicação de uma interação apresenta terminologia “x” entre os fatores de interação. Ou seja, para representar a interação entre os fatores B e C deve ser indicado um fator com a terminologia “BxC”. A alocação das interações na matriz ortogonal está pré-definida de acordo com a tabela triangular e grafos lineares. Para a matriz L_8 os grafos lineares possíveis apresentam-se na Figura 6 (Anexo A).

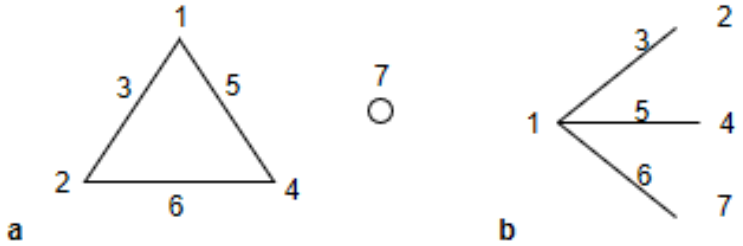


Figura 6 – Grafos Lineares AO L_8 (adaptado) (Ross, 1996)

Para analisar a interação entre dois fatores é necessário atribuir uma coluna à interação. A alocação da interação na matriz é obtida através do cruzamento das colunas dos fatores em causa. No caso de ambos os fatores apresentarem níveis iguais, atribui-se ao nível 1 à interação, caso os fatores apresentem níveis diferentes é atribuído o nível 2 à interação. A Figura 6 (a, b) apresentam ambos os grafos da matriz L_8. Nesta representação gráfica os nódos correspondem às colunas dos fatores e as linhas que une os nódos corresponde à coluna de interação entre esses. A interação entre os fatores da matriz também está representada através da tabela de interações para a matriz L_8, Tabela 5 (Roy, 2010).

Tabela 5 – Interações na matriz L_8 (adaptado) (Roy, 2010)

Coluna	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
1	***(1)***	3	2	5	4	7	6
2		***(2)***	1	6	7	4	5
3			***(3)***	7	6	5	4
4				***(4)***	1	2	3
5					***(5)***	3	2
6						***(6)***	7
7							***(7)***

Nesta tabela os números entre parêntesis e a negrito representam os fatores, a interação entre ambos os fatores indica o número da coluna da interação. Ou seja, na coluna 3 contem a interação entre os fatores 1 e 2. Na coluna 6 está contida a interação entre os fatores 2 e 4. A Tabela 6 apresenta a matriz L_8 com a interação entre o fator A e B nas colunas 1 e 2 alocado na coluna 3.

Tabela 6 – Matriz ortogonal L_8 com 6 fatores e 1 interação (adaptado) (Roy, 2010)

Ensaio	**A**	**B**	**AxB**	**C**	**D**	**E**	**F**
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2

4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

A Tabela 7, apresenta uma matriz ortogonal L_8 para 4 fatores e 3 interações (AxB, AxC e BxC).

Tabela 7 – Matriz ortogonal L_8 com 4 fatores e 3 interações (adaptado) (Roy, 2010)

Ensaio	A	B	AxB	C	AxC	BxC	D
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

A matriz L_9 permite a alocação de 3 níveis (1, 2 e 3) e 4 fatores (A, B, C e D). A Tabela 8 apresenta a matriz L_9.

Tabela 8 – Matriz ortogonal L9 com 4 fatores e 3 níveis (adaptado) (Roy, 2010)

Ensaio	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

2.2.4 INCLUSÃO DE FATORES DE RUÍDO NA EXPERIÊNCIA

Taguchi recomenda a inclusão de fatores controláveis e fatores não controláveis (fatores de ruído) na experiência. Assim, a alocação dos fatores controláveis designa-se por matriz

interna, e dos fatores de ruído de matriz externa. Ambas as matrizes são agrupadas como mostra a Figura 7. Na figura a matriz interna é uma L_8, com sete fatores e a matriz externa uma L_4 com 4 fatores de ruído. A matriz externa pode ser uma matriz de Taguchi ou outra matriz dependendo da informação necessária ao estudo a desenvolver (Requeijo & Pereira, 2012).

Matriz Externa (L4)

	1	2	3	4
R1	1	1	2	2
R2	1	2	1	2
R3	1	2	2	1

Matriz Interna (L8)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	y11	y12	y13	y14	$\bar{Y}$	(S/N)
1	1	1	1	1	1	1	1	y21	y22	y23	y24	$\bar{Y}_1$	(S/N)1
2	1	1	1	2	2	2	2	...	...	...	...	$\bar{Y}_2$	(S/N)2
3	1	2	2	1	1	2	2	...	...	...	...		.
4	1	2	2	2	2	1	1	...	...	...	...		.
5	2	1	2	1	2	1	2	...	...	...	...		.
6	2	1	2	2	1	2	1	...	...	...	...		.
7	2	2	1	1	2	2	1	...	...	...	...		.
8	2	2	1	2	1	1	2	y81	y82	y83	y84	$\bar{Y}_8$	(S/N)8

Figura 7 – Matriz Interna e Matriz Externa (adaptado) (Pereira & Requeijo, 2012)

A inclusão de fatores de ruído na matriz experimental pode ser dispensada quando o controlo dos fatores de ruído se torna muito dispendioso ou difícil. Para minimizar esta limitação é frequente a replicação da experiência, pois o ruído poderá manifestar-se nas diversas réplicas (Requeijo & Pereira, 2012).

Na ótica de Phadle (1989), os fatores de ruido podem ser classificados em três categorias:

Exteriores – O meio ambiente em que o produto está envolvido e a contribuição para alterações do produto com a exposição ao ambiente envolvente. Como exemplo destes fatores exteriores são a temperatura, humidade, pressão, vibração, entre outros.

Deterioração – A alteração das características dos produtos ao longo do tempo, afetando a qualidade dos mesmos.

Unidade para unidade – A variabilidade do processo que pode afetar consequentemente a qualidade de unidade para unidade.

2.3 ANÁLISE DE RESULTADOS

No método de Taguchi os resultados experimentais permitem responder aos seguintes objetivos (Roy, 2010):

- Determinar as condições ótimas para um produto ou processo;
- Estudar a contribuição individual de cada fator para os resultados experimentais;
- Estudar as respostas sob as condições ótimas.

As condições ótimas são identificadas pelo estudo de principais efeitos de cada fator (análise gráfica). A análise dos efeitos de cada fator pode ser realizada através do efeito médio e da análise da variância (ANOVA), sendo ambos complementares.

2.3.1 ANÁLISE GRÁFICA

A análise dos resultados do método de Taguchi pode ser ilustrado através do exemplo apresentado por Krishnaiah e Shahabudeen (2012):

Para uma experiência realizada com o objetivo de estudar o efeito de sete fatores (A, B, C, D, E, F e G) com dois níveis usando a matriz L_8, os resultados (respostas) de duas replicações, R1 e R2, apresentam-se na Tabela 9.

Tabela 9 – Matriz L_8 com respostas de duas replicações (adaptado) (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012)

	Fatores							Respostas	
Ensaio	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**R1**	**R2**
1	1	1	1	1	1	1	1	11	11
2	1	1	1	2	2	2	2	4	4
3	1	2	2	1	1	2	2	4	10
4	1	2	2	2	2	1	1	4	8
5	2	1	2	1	2	1	2	9	4
6	2	1	2	2	1	2	1	4	3
7	2	2	1	1	2	2	1	1	4
8	2	2	1	2	1	1	2	10	8

Através dos resultados obtidos na Tabela 9, são desenvolvidos os cálculos do fator para cada nível de cada ensaio, Tabela 10.

Tabela 10 – Respostas de nível 1 e 2 para cada fator (adaptado) (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012)

	Fatores						
Ensaio	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**
Nível 1	56	50	53	54	61	65	46
Nível 2	43	49	46	45	38	34	53

Esta tabela é obtida através do valor de resposta para cada nível (nível 1 e 2) para cada fator. Ou seja, para o nível 1 do fator A corresponde à soma dos resultados dos ensaios 1,2, 3 e 4.

$$A_1 = (11 + 11) + (4 + 4) + (4 + 10) + (4 + 8) = 56$$

$$A_2 = (9 + 4) + (4 + 3) + (1 + 4) + (10 + 8) = 43$$

O mesmo raciocínio é aplicado para os restantes níveis e fatores (B1, B2, C1, C2, D1, D2, E1, E2, F1, F2, G1 e G2. Os fatores médios dos para cada nível dos fatores é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Efeito médio da resposta e ranking do efeito dos fatores (adaptado) (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012)

Fator	A	B	C	D	E	F	G
Nível 1	7,00	6,25	6,63	6,75	7,63	8,13	5,75
Nível 2	5,38	6,13	5,75	5,63	4,75	4,25	6,63
Diferença	1,62	0,12	0,88	1,12	2,88	3,88	0,88
Ranking	3	7	5	4	2	1	6

A Tabela 11 apresenta o efeito médio de cada nível para cada fator. As respostas totais são convertidas em respostas médias, dividindo as respostas totais de cada nível de fator por 8 (número de ensaios). A diferença absoluta entre cada nível por fator é apresentada como diferença na Tabela 11. O ranking de cada fator é atribuído através da maior diferença com a posição 1 e assim sucessivamente para os restantes fatores.

Através da Tabela 11 verifica-se que o fator com maior efeito corresponde ao fator F (ranking 1) e a média geral corresponde a:

$$\bar{Y} = \frac{Total\ de\ todas\ as\ respostas}{Total\ de\ observações\ do\ fator} = \frac{99}{16} = 6{,}19$$

Para o valor do efeito médio dos fatores é possível apresentar os resultados da Tabela 11 através do gráfico da Figura 8.

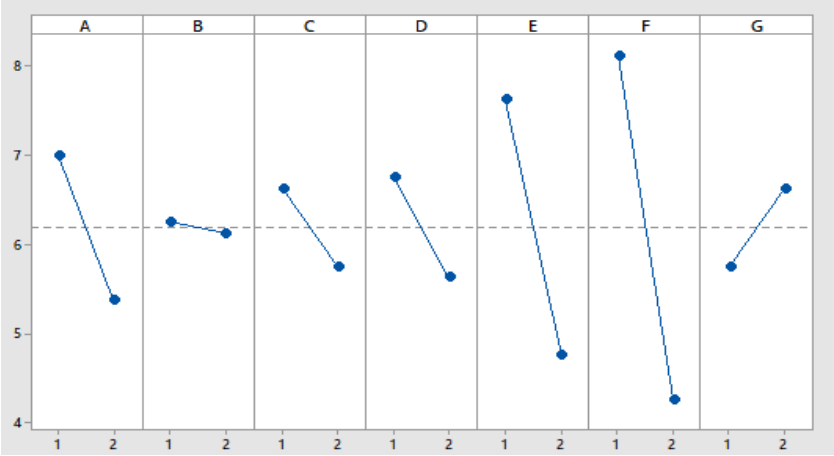


Figura 8 – Gráfico do efeito médio dos fatores (adaptado) (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012)

A seleção dos parâmetros com melhores resposta para o problema em análise está condicionada ao objetivo da experiência. Ou seja, supondo que o objetivo da experiência é maximizar a resposta então a condição ótima é selecionada de acordo com o valor médio mais alto de cada fator. Através da Figura 8 a condição ótima é A1 B1 C1 D1 E1 F1 G2. Nem todos os fatores contribuem significativamente para a maximização da resposta. A determinação dos fatores significativos corresponde a metade do número de graus de

liberdade do AO. A seleção é feita através do fator com o ranking mais alto (1) até ao efeito com menor ranking, correspondente aos graus de liberdade significativos. Com base na Tabela 11 os fatores significativos são F1, E1 e A1 com as posições no ranking 1, ranking 2, ranking 3.
A resposta ótima prevista é determinada por:

$$\mu_{pred} = \bar{Y} + (\overline{F_1} - \bar{Y}) + (\overline{E_1} - \bar{Y}) + (\overline{A_1} - \bar{Y}) = (\overline{F_1} + \overline{E_1} + \overline{A_1}) - 2\bar{Y}$$

$$\mu_{pred} = 6{,}19 + (8{,}13 - 6{,}19) + (7{,}63 - 6{,}19) + (7{,}00 - 6{,}19)$$

$$\mu_{pred} = (8{,}13 + 7{,}63 + 7{,}00) - 2x(6{,}19) = 22{,}76 - 12{,}38 = 10{,}38$$

A análise dos resultados no início das aplicações do método de Taguchi era efetuada essencialmente pela análise gráfica, no entanto esta abordagem foi bastante criticada considerando os estatísticos que a análise de variância seria o método científico mais correto para avaliar a significância dos efeitos médios dos fatores (Pereira & Requeijo, 2012).

2.3.2 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

A análise de variância é um método estatístico que permite a interpretação dos dados experimentais. A ANOVA não pretende analisar os dados obtidos, mas a variabilidade dos dados (Roy, 2010). Esta técnica é utilizada para avaliar a contribuição de cada fator no resultado. É calculada a variância entre grupos e dentro de grupos. O quociente entre estas variâncias é o fator de Fisher (F). A aplicação do teste de hipóteses (teste F) permite indicar quais os efeitos significativos. O teste de hipóteses estuda como hipótese nula (H_0) as médias são significativamente iguais e a hipótese alternativa (H_1) as médias são significativamente diferentes. A tabela anova apresenta os seguintes componentes:

Graus de liberdade (GL) – os graus de liberdade corresponde à medida de quantidade de informação obtida através de determinados dados (Roy, 2010). Por exemplo, para um fator com quatro níveis, os dados podem ser comparados com os restantes níveis, logo existem 3 graus de liberdade (Roy, 2010).
Os graus de liberdade associados ao erro experimental podem ser permutados por graus de liberdade de fatores, com o objetivo de resultar mais informação. No entanto, quando todos os graus de liberdade possíveis são associados a fatores, sem que resultem graus de liberdade para o erro experimental a matriz experimental designa-se por saturada.

Soma dos quadrados (SQ) – a soma dos quadrados é a medida do desvio dos dados em relação ao valor médio. A soma dos quadrados dos desvios realça o desvio total (Roy, 2010).
SQ_f é a variação entre os níveis, é a soma dos ponderada dos quadrados das diferenças entre as médias dos níveis e a média global.
SQ_e ou erro é a variação dentro dos níveis é a soma dos quadrados dos desvios das observações em relação às médias dos respetivos níveis.

A análise ANOVA apresenta-se sintetizada sob forma de tabela (Tabela 12).

Tabela 12 – Tabela ANOVA

Fonte	GL	SQ	MQ	Valor F
Fator	$K-1$	SQ_f	$\frac{SQ_f}{K-1}$	$\frac{SQ_f/_{K-1}}{SQ_e/_{N-k}}$
Erro	$N-K$	SQ_e	$\frac{SQ_e}{N-k}$	
Total	$N-1$	SQ_{total}		

Onde:
N = número total de observações
SQ_f= soma dos quadrados do fator
K= número de níveis do fator
SQ_e = soma dos quadrados do erro
V_f= variância do fator
V_e= variância do erro
SQ_{total}= Soma dos quadrados total

Razão de variância – também designada de estatística *F*, permite a tomada de decisão para um determinado nível de confiança. No contexto de planeamento de experiências permite determinar se um parâmetros é significativo (Roy, 2010).

A razão de variância comparada com o valor *F* do fator e o *F* critico, tabelado (Anexo B). Os valores tabelados estão organizados por nível de confiança definido pelo investigador e pelos graus de liberdade associados ao fatores e erro, (numerador, df_1 e denominador, df_2).

Nível de confiança – calculado através do nível de significância, α, que traduz o risco de rejeitar a hipótese nula (H_0) quando esta é verdadeira, erro do tipo I. Calculada através da equação:

$$Nível\ de\ confiança = 1 - \alpha$$

Percentagem de contribuição – indica a relevância de cada fator nos resultados da experiência. A percentagem de erro pode indicar a existência de fatores relevantes que não foram incluídos no estudo. Contribuição do erro experimental elevado pode também indicar que os fatores não foram controlados de forma precisa ou erro de medição excessivo (Ross, 1996).
A percentagem de contribuição é calculada através da equação:

$$P_{fator} = \frac{SQ_{fator} - (gl\ do\ fator)\ x\ QM_{erro}}{SQ_{total}}\ x\ 100$$

Em experimentos cujas matrizes são saturadas (todas as colunas do arranjo ortogonal possuem fatores atribuídos) e a experiência não possui replicações é recomendável a realização do *pooling* dos fatores e/ou interações com o objetivo de permanecerem os fatores com maior influência na resposta (Roy, 2010).
Pooling consiste na desconsideração dos fatores com menor contribuição para a resposta da experiência. Os fatores selecionados para a desconsideração são agregados ao erro ajustando a contribuição dos restantes fatores. O *pooling* pode ser desenvolvido através do *pooling up* ou *pooling down*.

Pooling up – é a abordagem recomendada por Taguchi no sentido de maximizar o número de fatores significativos. Esta abordagem inicia-se com a associação ao erro do fator com menor soma dos quadrados. De seguida são desconsiderados os próximos fatores com a menor soma dos quadrados, iterativamente, até que um dos fatores seja significativo (Roy, 2010).

Pooling down – nesta abordagem é realizado o processo inverso ao *pooling up*. Inicialmente são desconsiderados todos os fatores, com a exceção do fator com maior influência. Posteriormente são considerados os fatores com maior influência, iterativamente, até um dos fatores seja significativo (Roy, 2010).

A análise dos resultados através da análise da variância para a matriz L_8 apresentada na Tabela 9 é agora desenvolvida.

$$CF = \frac{T^2}{N}$$

Onde:
T^2 =soma de todas as respostas
N = número de respostas

$$CF = \frac{99^2}{16} = 612{,}56$$

$$SQ_{Total} = \sum_{i=1}^{N} y_i^2 - CF$$

$$SQ_{Total} = (11)^2 + (4)^2 + \cdots + (10)^2 + (8)^2 - 612{,}56 = 160{,}44$$

O efeito do fator é calculado pela soma dos quadrados usando o total dos níveis.

$$SQ_A = \frac{A_1^2}{n_{A1}} + \frac{A_2^2}{n_{A2}} - CF$$

Onde:
A_1 = nível 1 total do fator A
n_{A1}= número de observações usadas em A_1

A_2 = nível 2 total do fator A
n_{A2}= número de observações usadas em A_2

$$SQ_A = \frac{56^{\,2}}{8} + \frac{43^{\,2}}{8} - 612{,}56 = 10{,}57$$

O mesmo raciocínio é aplicado para os restantes fatores.

$$SQ_B = \frac{50^{\,2}}{8} + \frac{49^{\,2}}{8} - 612{,}56 = 0{,}07$$

$$SQ_C = \frac{53^{\,2}}{8} + \frac{46^{\,2}}{8} - 612{,}56 = 3{,}07$$

$$SQ_D = \frac{54^{\,2}}{8} + \frac{45^{\,2}}{8} - 612{,}56 = 5{,}07$$

$$SQ_E = \frac{61^{\,2}}{8} + \frac{38^{\,2}}{8} - 612{,}56 = 33{,}07$$

$$SQ_F = \frac{65^{\,2}}{8} + \frac{34^{\,2}}{8} - 612{,}56 = 60{,}07$$

$$SQ_G = \frac{46^{\,2}}{8} + \frac{53^{\,2}}{8} - 612{,}56 = 3{,}07$$

A soma do erro ao quadrado é calculada através da equação:

$$SQ_e = SQ_{Total} - (SQ_A + SQ_B + SQ_C + SQ_D + SQ_E + SQ_F + SQ_G)$$

$$SQ_e = 160{,}44 - (10{,}57 + 0{,}07 + 3{,}07 + 5{,}07 + 33{,}07 + 60{,}07 + 3{,}07) = 45{,}45$$

Tabela 13 – Análise de variância – ANOVA (adaptado) (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012)

Fator	GL	SQ	MQ	Valor F	Contribuição (%)
A	1	10,57	10,57	1,86	6,59
B	1	0,07	0,07	0,01	0,04
C	1	3,07	3,07	0,54	1,91
D	1	5,07	5,07	0,89	3,16
E	1	33,07	33,07	5,82	20,62
F	1	60,7	60,07	10,58	37,44
G	1	3,07	3,07	0,54	1,91
Erro	8	45,45	5,68	28,33	
Total	15	160,44			

Para o nível de significância de 5%, $F_{(0,05;1;8)}$ = 5,32, verifica-se que apenas os fatores E e F são significativos. A contribuição dos fatores é de aproximadamente 52% da variação total.

A análise dos resultados para experiências com interação de fatores é apresentada com a matriz L_8, Tabela 14.

Tabela 14 – Matriz L8 com interações de fatores (adaptado) (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012)

	Fatores							Respostas		
Ensaio	**D**	**C**	**CD**	**A**	**AD**	**B**	**E**	**R1**	**R2**	**R3**
1	1	1	1	1	1	1	1	11	4	11
2	1	1	1	2	2	2	2	4	4	4
3	1	2	2	1	1	2	2	4	1	14
4	1	2	2	2	2	1	1	4	0	8
5	2	1	2	1	2	1	2	9	8	4
6	2	1	2	2	1	2	1	4	1	1
7	2	2	1	1	2	2	1	1	4	4
8	2	2	1	2	1	1	2	14	4	8

A análise das respostas da experiência de matriz L_8 da Tabela 14 para cada nível dos fatores apresenta-se na Tabela 15.

Tabela 15 – Respostas de nível 1 e 2 para cada fator (adaptado) (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012)

	Fatores						
Ensaio	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**	**AD**	**CD**
Nível 1	75	85	65	69	53	77	73
Nível 2	56	46	66	62	78	54	58

Calculando a média das respostas:

$$\bar{Y} = \frac{Total\ de\ todas\ as\ respostas}{Total\ de\ respostas} = \frac{131}{24} = 5{,}46$$

Esta tabela é obtida através do valor de resposta para cada nível (nível 1 e 2) para cada fator. Ou seja, para o nível 1 do fator A corresponde à soma dos resultados dos ensaios 1,2, 3 e 4.

$$A_1 = (11 + 4 + 11) + (4 + 1 + 14) + (9 + 8 + 4) + (14 + 4 + 8) = 75$$

O mesmo raciocínio é aplicado para os restantes níveis e fatores (B1, B2, C1, C2, D1, D2, E1, E2, AD1, AD2, CD1 e CD2. Os fatores médios dos para cada nível dos fatores é apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 – Efeito médio da resposta e ranking do efeito dos fatores (adaptado) (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012)

Fator	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**	**AD**	**CD**
Nível 1	6,25	7,08	5,42	5,75	4,42	6,42	6,08

Nível 2	4,67	3,83	5,50	5,17	6,50	4,50	4,83
Diferença	1,58	3,25	0,08	0,58	2,08	1,92	1,25
Ranking	4	1	7	6	2	3	5

A representação gráfica da Tabela 16 apresentam-se na Figura 9.

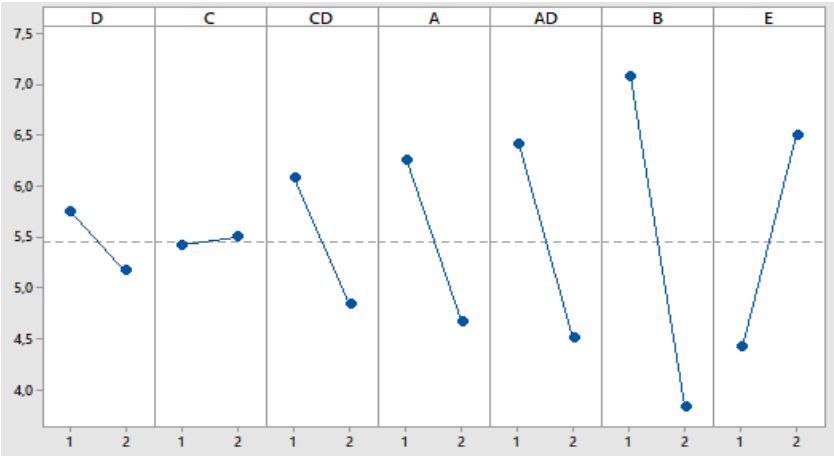


Figura 9 – Gráfico do efeito médio dos fatores

Através da análise do gráfico, da Figura 9, é possível determinar quais os fatores mais significativos para a experiência. A seleção dos fatores significativos através deste método é determinada pelo número de graus de liberdade do arranjo ortogonal da experiência. Assim, são considerados significativos os fatores que correspondem a metade do número de graus de liberdade do arranjo ortogonal. Neste exemplo, são considerados fatores significativos 3 ou 4 fatores. Considerando 4 fatores significativos, a seleção de fatores corresponde aos fatores: B, E, AD e A. A interação AD apresenta-se como fator significativo, assim a interação AD pode ser aberta nas seguintes condições: A1D1, A1D2, A2D1, A2D2, (Tabela 17). Para a maximização da resposta o componente A1D1 é a condição ótima.

Tabela 17 – Abertura da interação dos fatores A e D (adaptado) (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012)

	D_1	D_2
A_1	45	24
A_2	30	32

A condição ótima para a maximização da resposta é B1 E2 A1D1 A1.
A resposta ótima prevista é:

$$\mu_{pred} = \bar{Y} + (\overline{A_1} - \bar{Y}) + (\overline{B_1} - \bar{Y}) + (\overline{E_2} - \bar{Y}) + (\overline{A_1 D_1} - \bar{Y}) - (\overline{A_1} - \bar{Y}) - (\overline{D_1} - \bar{Y})$$

$$\mu_{pred} = \overline{B_1} + \overline{E_2} + \overline{A_1 D_1} - \overline{D_1} - \bar{Y}$$

$$\mu_{pred} = 7{,}08 + 6{,}50 + 7{,}50 - 5{,}78 - 5{,}46 = 9{,}87$$

A análise dos resultados através da ANOVA inicia-se com o cálculo da soma dos quadrados de cada fator e análise da tabela ANOVA.

$$SQ_A = \frac{(75)^2}{12} + \frac{(56)^2}{12} - \frac{(131)^2}{24} = 15{,}04$$

$$SQ_B = \frac{(85)^2}{12} + \frac{(46)^2}{12} - \frac{(131)^2}{24} = 63{,}38$$

$$SQ_C = \frac{(65)^2}{12} + \frac{(66)^2}{12} - \frac{(131)^2}{24} = 0{,}04$$

$$SQ_D = \frac{(69)^2}{12} + \frac{(62)^2}{12} - \frac{(131)^2}{24} = 2{,}04$$

$$SQ_E = \frac{(53)^2}{12} + \frac{(78)^2}{12} - \frac{(131)^2}{24} = 26{,}04$$

$$SQ_{AD} = \frac{(77)^2}{12} + \frac{(54)^2}{12} - \frac{(131)^2}{24} = 22{,}04$$

$$SQ_{CD} = \frac{(73)^2}{12} + \frac{(58)^2}{12} - \frac{(131)^2}{24} = 9{,}38$$

$$SQ_e = 371{,}97 - (15{,}04 + 63{,}38 + 0{,}04 + 2{,}04 + 26{,}04 + 22{,}04 + 9{,}38) = 234{,}01$$

$$SQ_{Total} = (11)^2 + (4)^2 + \cdots + (11)^2 + (4)^2 - 715{,}04 = 371{,}97$$

Tabela 18 – Tabela ANOVA (adaptado) (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012)

Fator	GL	SQ	MQ	Valor F	Contribuição (%)
A	1	15,04	15,04	1,03	4,04
B	1	63,38	63,38	4,33	17,04
C	1	0,04	0,04	0,00	0,01
D	1	2,04	2,04	0,14	0,55
E	1	26,04	26,04	1,78	7,00
AD	1	22,04	22,04	1,51	5,93
CD	1	9,38	9,38	0,64	2,52
Erro	16	234,01	14,63		62,91
Total	23	371,97			100,00

O teste F para a Tabela 18, $F_{(0,05;1;16)} = 4{,}49$, mostra que nenhum dos efeitos é significativo, a soma dos quadrados do erro é muito elevada, (contribuição de 62,91%). Este facto pode indicar que alguns fatores significativos não foram analisados no estudo. No entanto, através do *pooling* dos fatores com menor contribuição é desenvolvida uma nova tabela ANOVA, Tabela 19. O recurso do *pooling* permitem que os fatores menos significativos sejam agregados ao erro permitindo que apenas sejam considerados os fatores com influência.

Tabela 19 – Tabela ANOVA com *pooling* de fatores(adapto) (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012)

Fator	GL	SQ	MQ	Valor F	Contribuição (%)
A	1	15,04	15,04	1,16	4,04
B	1	63,38	63,38	4,90	17,04
E	1	26,04	26,04	2,02	7,00
AD	1	22,04	22,04	1,71	6,02
Erro (pooled)	19	245,47	12,92		65,99
Total	23	371,97			100,00

Os fatores C, D e CD são desconsiderados através do *pooling up*. Neste exemplo, são desconsiderados 3 fatores, mantendo os 4 fatores mais significativos do arranjo ortogonal (A, B, E, AD). Desconsiderar 3 fatores permite manter na tabela ANOVA, (Tabela 19) metade dos graus de liberdade dos fatores usados no arranjo ortogonal. Ou seja, para o arranjo ortogonal com 7 graus de liberdade, são desconsiderados 3 ou 4 fatores. Estes fatores são agora agregados ao erro, aumentando o número de graus de liberdade de 12 para 19. O valor $F_{(0,05;1;19)} = 4,38$, evidência que o fator B é significativo. Na análise ANOVA desenvolvida inicialmente (Tabela 18) nenhum dos fatores se apresentava significativo, após o *pooling up* dos fatores é possível determinar um fator significativo, fator B.

2.3.3 RAZÃO SINAL-RUÍDO

Taguchi propõe a razão sinal-ruído, S/R, como medida de desempenho que se pretende maximizar, para diminuir a variabilidade de produtos e processos. A transformação dos dados a partir de experiências repetidas através da razão S/R (por repetição ou replicação) reflete a variação presente na experiência. Foram desenvolvidas várias expressões de razão sinal-ruído, de acordo com o tipo de característica da qualidade, sendo as mais conhecidas as seguintes: Menor-é-melhor, Nominal-é-melhor e Maior-é-melhor.

Nominal -é-melhor: As caraterísticas da qualidade deste tipo apresentam respostas do tipo contínuas e não negativas, com valores entre zero a mais infinito. O valor alvo é diferente de zero e infinito. A equação para determinar a razão S/R é (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012):

$$(S/R)_i = 10 \log \left[\frac{\bar{Y}_i^2}{S_i^2} \right]$$

Onde:
$(S/R)_i$ - razão sinal-ruído da experiência i = 1,2,…,N, em decibéis (dB)
n - Número de observações para cada experiência
$\bar{Y}_i^2$ – Média amostral para a experiência i;
S_i^2 – Variância amostral para a experiência i;

Menor-é-melhor: As caraterísticas da qualidade deste tipo apresentam respostas do tipo contínuas e não negativas; o valor alvo desta caraterística é zero. A equação para determinar a razão S/R é (Pereira & Requeijo, 2012):

$$(S/R)_i = -10\log\left[\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} y_{ij}^2\right]$$

Onde:
$(S/R)_i$ - Razão sinal-ruído da experiência *i* = 1,2,…,N, em decibéis (dB)
n - Número de observações para cada experiência
y_{ij} – j-ésima observação da experiência *i*;

Maior-é-melhor: As caraterísticas da qualidade deste tipo apresentam respostas do tipo contínuas e não negativas, de zero até infinito. A equação para determinar a razão S/R é (Pereira & Requeijo, 2012):

$$(S/R)_i = -10\log\left[\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} \frac{1}{y_{ij}^2}\right]$$

Onde:
$(S/R)_i$ - Razão sinal-ruído da experiência *i* = 1,2,…,N, em decibéis (dB)
n - Número de observações para cada experiência
y_{ij} – j-ésima observação da experiência *i*;

Após a análise dos dados através da razão sinal-ruído, bem como a identificação dos melhores níveis, calcula-se o valor ótimo previsto. Nesta fase é determinada resposta prevista com a utilização dos melhores níveis de fatores para a resposta de qualidade. Posteriormente, Taguchi recomenda a realização de experiências de confirmação da resposta ótima calculada, comparando os resultados experimentais com o valor ótimo previsto. Nesta abordagem Taguchi não menciona a verificação dos pressupostos da análise de variância, tendo como objetivo a determinação de soluções em termos de engenharia, em detrimento da correlação estatística, sendo por este motivo alvo de críticas. Este facto permite a retirada de conclusões de forma mais simples e rápida o que permite a aplicação do método de Taguchi seja frequentemente utilizado em contexto industrial (Fowlkes & Creveling, 1995).

2.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE TAGUCHI

O método de Taguchi surge com o objetivo de melhorar a qualidade dos produtos e processos, através da experimentação com custo e tempo reduzidos. Este método é aplicado em muitas áreas do conhecimento, como medicina, química, farmacologia, engenharia dos processos de fabrico, engenharia dos materiais, marketing existindo até referência à aplicação deste método a técnicas de otimização.
Na área da medicina, Lopes et al. (2016), apresentam uma investigação que aplica o método de Taguchi para a determinação dos parâmetros ótimos na furação do tecido ósseo com recursos ao método de Taguchi. Nesta investigação o objetivo de estudar o efeito da

variação da velocidade de rotação e do diâmetro da broca no aumento de temperaturas no tecido ósseo, durante o processo de furação. A realização dos ensaios foi baseada no método de Taguchi, para obtenção da combinação ótima dos parâmetros de furação. Foi utilizada uma matriz ortogonal L_9 e analisada a razão sinal-ruído, bem como a proporção de Pareto para obter o efeito e a interação de cada parâmetro no processo.

No âmbito dos dispositivos médicos Bown et al. (2015), aplicam o método de Taguchi para a análise dos parâmetros construtivos no funcionamento de um equipamento de infusão mecanizada. Neste trabalho, estudou-se a pressão atingida na bomba peristáltica linear, o mesmo não atingia os critérios para a libertação do produto no mercado. Foram verificados os efeitos dos parâmetros, molas, material de prensor, distância entre dedos e prensor, chapa metálica e alavanca, através de uma matriz L_8 estudados os efeitos dos parâmetros no funcionamento do equipamento.

A determinação de parâmetros dos processos produtivos de dispositivos médicos como os parâmetros de processo de uma seladora de *Tyvek* é estudado por Terán et al. (2015). Neste trabalho, "Desenho robusto de parâmetros para o processo de selagem de bolsas *Tyvek* 1073b - PET em máquinas de selagem contínua", os autores estudam os efeitos dos parâmetros de selagem nas bolsas *Tyvek*. O método de Taguchi é aplicado através de uma matriz L_9 para os fatores controláveis e L_9 para os fatores de ruído. Os fatores controláveis foram a temperatura, pressão e velocidade. Os fatores de ruído foram a espessura da parede e altura da bolsa com objetivo de diminuir a variação dos valores de rompimento resultantes da variação do material.

No âmbito da engenharia dos materiais, Aslan (2010) aplica o método de Taguchi para a otimização do processo produtivo "Uma otimização da moagem de calcite usando o método de Taguchi com múltiplas caraterísticas de desempenho.

Estudos de otimização de processos produtivos recorrem com frequência à aplicação do método de Taguchi. Os autores Gunay e Yucel (2013) apresentam o estudo "Aplicação do método Taguchi para determinação da superfície ótima rugosidade no torneamento de ferro fundido branco de alta liga". Pundir et al. (2018) desenvolvem o estudo de "Aplicação do método de Taguchi para a otimização dos parâmetros do processo para a remoção de cobre e níquel pelo crescimento de *Aspergillus sp*.

Os estudos referidos neste capítulo apresentam uma abordagem comum. Todos eles iniciam com a questão de investigação, problema de investigação ou objetivo. Identificam e definem a caraterística de qualidade em estudo, os fatores controláveis e os respetivos níveis. Nesta fase é possível definir a matriz ortogonal e planear a experiência. Após a realização da experiência os resultados são tratados com o recurso a métodos estatísticos como ANOVA e realizado o estudo S/R. Em grande parte, é realizada a experiência de confirmação para avaliar a resposta prevista pelo método.

2.5 DISPOSITIVOS MÉDICOS

Os dispositivos médicos (DM) desempenham um papel relevante na área da saúde. Um dispositivo médico é definido pelo Decreto-Lei nº145/2009, de 17 de Junho, alínea *t*, artigo 3º: "«Dispositivo médico» qualquer instrumento, aparelho, equipamento, software,

material ou artigo utilizado isoladamente ou em combinação, incluindo o software destinado pelo seu fabricante a ser utilizado especificamente para fins de diagnóstico ou terapêuticos e que seja necessário para o bom funcionamento do dispositivo médico, cujo principal efeito pretendido no corpo humano não seja alcançado por meios farmacológicos, imunológicos ou metabólicos, embora a sua função possa ser apoiada por esses meios, destinado pelo fabricante a ser utilizado em seres humanos para fins de: Diagnóstico, prevenção, controlo, tratamento ou atenuação de uma doença; Estudo, substituição ou alteração da anatomia ou de um processo fisiológico; Controlo da conceção;" (Decreto Lei nº 145, 2009).

A classificação de dispositivo médico abrange uma elevada diversidade de dispositivos que variam de acordo com a complexidade e utilização. Por exemplo, dispositivos mais simples são os pensos rápidos, luvas descartáveis e dispositivos mais complexos como próteses implantáveis, grampos.

Os dispositivos médicos classificam-se de acordo com o nível de risco que representam para os utilizadores. Em Portugal, aplicam-se as diretivas definidas para todos os estados membros da União Europeia, segundo as quais um dispositivo médico pode ser comercializado em todos os estados membros de UE. A supervisão do setor é da responsabilidade de cada estado membro pela respetiva autoridade competente, em Portugal é assumida pelo INFARMED – Autoridade Nacional do Medicamento e dos Produtos de Saúde I.P. (Kramer & Kesselheim, 2012).

De acordo com o INFARMED os dispositivos médicos podem ser ("Infarmed," 2019):

Dispositivo médico ativo: "qualquer dispositivo médico cujo funcionamento depende de uma fonte de energia elétrica, ou outra não gerada diretamente pelo corpo humano ou pela gravidade, e que atua por conversão dessa energia, não sendo considerados como tal, os dispositivos destinados a transmitir energia, substâncias ou outros elementos entre um dispositivo médico ativo e o doente, sem qualquer modificação significativa e sendo que o software, por si só, é considerado um dispositivo médico ativo."

Dispositivo médico de uso único: São dispositivos médicos destinados pelo seu fabricante a serem utilizados uma única vez num único doente.

Dispositivo médico implantável: São considerados dispositivos médicos implantáveis os dispositivos destinados a ser introduzidos totalmente no corpo humano, ou a substituir uma superfície epitelial ou a superfície do olho através de uma intervenção cirúrgica e que se destinem a ser conservados no local após a intervenção.

Dispositivo médico implantável ativo: Qualquer dispositivo médico ativo que seja concebido para ser total ou parcialmente introduzido através de uma intervenção cirúrgica ou médica no corpo humano ou por intervenção médica num orifício natural, e destinado a ficar implantado.

Dispositivo médico para a investigação clínica: Qualquer dispositivo destinado a ser utilizado por um investigador, num centro de investigação, com vista a ser submetido às investigações referidas no n.º 13 do anexo XVI do Decreto-Lei n.º 145/2009 de 17 de Junho, num ambiente clínico e humano adequado. Para efeito da realização das investigações clínicas, o investigador é qualquer pessoa que, dadas as suas qualificações profissionais, esteja autorizada a efetuar as referidas investigações, tais como: médico de especialidade. Estes têm de ser devidamente identificados com a menção "exclusivamente para investigação clínica", e só podem ser utilizados no âmbito da investigação clínica para que foram criados e sob a responsabilidade do pessoal autorizado nessa investigação.

Dispositivos feitos à medida: Qualquer dispositivo médico fabricado especificamente de acordo com a prescrição médica, sob a responsabilidade do prescritor, com indicação de características de conceção específicas e que se destine a ser como tal exclusivamente utilizado num doente determinado, não sendo considerados os dispositivos fabricados de acordo com métodos de fabrico contínuo ou em série, que careçam de adaptação para satisfazerem os requisitos específicos do médico ou de qualquer outro utilizador profissional.

Dispositivos médicos com menor risco são declarados à autoridade competente do estado membro (em Portugal, o INFARMED). Dispositivos médicos de risco mais elevado são declarados pelos Organismos Notificados. O organismo notificado é um organismo reconhecido pela UE para avaliação da conformidade para a obtenção da marcação CE. A marcação CE é obtida através da evidência do cumprimento dos requisitos regulamentares.

Os DM estão divididos em quatro classes de risco, tendo em conta a vulnerabilidade do corpo humano e os riscos decorrentes da conceção e produção. A classificação atribuída pelo fabricante de acordo com a classe de risco é fundamentada através do anexo IX do Decreto-Lei nº145/2009 de 17 de Junho (“Infarmed,” 2019).

Classe I (baixo risco): todos os dispositivos não invasivos destinados à condução ou ao armazenamento de sangue, líquidos ou tecidos corporais; dispositivos destinados à imobilização de partes do corpo e/ou aplicar força ou compressão; dispositivos utilizados para suporte externo do paciente; dispositivos não invasivos que contactam com a pele lesada e que são utilizados como barreira mecânica, para compressão ou absorção de exsudados;
São exemplo de DM desta classe de risco: colares cervicais; camas hospitalares; pensos rápidos, meias de compressão; fraldas para incontinência; estetoscópio; óculos; seringas sem agulha, luvas de exame; algodão hidrófilo, entre outros (“Infarmed,” 2019).

Classe IIa (baixo/médio risco): Dispositivos que se destinam a controlar o micro ambiente de uma ferida; Dispositivos ativos com função de medição; Dispositivos invasivos de orifícios do corpo, que se destinam a ser ligados a um dispositivo médico ativo; Dispositivos

invasivos de carácter cirúrgico, destinados a utilização temporária; Os dispositivos especificamente destinados ao registo de imagens radiográficas;
São exemplos de DM desta classe e risco os seguintes produtos: compressas de gaze hidrófila esterilizadas e não esterilizadas; adesivos oclusivos para uso tópico; cateteres urinários; medidores de tensão; irrigadores nasais equipados com motor; luvas cirúrgicas, entre outros ("Infarmed," 2019).

Classe de risco IIb (médio/alto risco): Dispositivos que se destinam à administração de medicamentos; Dispositivos utilizados na contraceção e/ou prevenção de doenças sexualmente transmissíveis; Dispositivos destinados especificamente a serem utilizados na desinfeção, limpeza, lavagem ou hidratação das lentes de contacto.
São exemplos de DM desta classe de risco os seguintes produtos: preservativos masculinos; diafragmas; canetas de insulina; material de pensos para feridas de pressão e ulceradas extensas e crónicas; soluções de conforto para portadores de lentes de contato; material de desinfeção de lentes de contacto.

Classe de risco III (alto risco): Dispositivos que incorporam uma substância medicamentosa e que constituem um único produto não reutilizável e em que a ação da substância é acessória à do dispositivo; Dispositivos utilizados na contraceção implantáveis ou invasivos de utilização a longo prazo; Dispositivos Médicos para Diagnóstico *In Vitro*; Dispositivos invasivos; Dispositivos cujo fabrico se utilizem tecidos de origem animal; Dispositivos implantáveis e os dispositivos invasivos utilizados em contacto direto com o coração, com o sistema circulatório ou nervoso central; Dispositivos implantáveis e os dispositivos invasivos que produzem um efeito biológico ou são absorvidos, totalmente ou em grande parte;
São exemplo de DM desta classe os seguintes produtos: pensos com medicamentos; dispositivo intra-uterinos; equipamento para medição de glicémia; reagente tiras-teste para determinação da glicémia, glicosúria e cetonúria; cateteres cardiovasculares; pacemaker temporário; cateteres cardiovasculares; válvulas cardíacas; clipes de aneurisma; cateteres vasculares centrais; suturas absorvíveis; implantes mamários, substitutos ósseos, entre outros ("Infarmed," 2019).

2.6 DESENVOLVIMENTO E PRODUÇÃO DE DISPOSITIVOS MÉDICOS

A comercialização de um novo dispositivo médico (DM) é precedida de um conjunto de etapas essenciais para que a introdução no mercado seja autorizada. O desenvolvimento de um DM inicia-se com a identificação de uma necessidade no mercado, melhorar a resposta de um DM através de uma nova abordagem tecnológica. A fase seguinte consiste na realização de uma pesquisa das necessidades do mercado e capacidade tecnológica para o desenvolvimento do DM. Segue-se a identificação das norma e requisitos legais aplicáveis ao DM. Inicia-se o desenvolvimento de protótipos definição de processos produtivos, caraterísticas do produto, que após validação e verificação inicia a produção e comercialização. Após a introdução no mercado o fabricante está obrigado a aplicação de

um plano de vigilância e comunicar todos os eventos adversos à autoridade competente (Infarmed).
O DM em estudo neste trabalho enquadra-se na classe de risco III designado por substituto ósseo.

DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

3.1 PRODUTO
3.2 PROCESSO PRODUTIVO
3.3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA
3.4 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO – MÉTODO DE TAGUCHI
3.4.1 CLASSIFICAÇÃO DO TIPO DE RESPOSTA
3.4.2 SELEÇÃO DOS NÍVEIS DOS FATORES E INTERAÇÕES
3.4.3 ESCOLHA DA MATRIZ ORTOGONAL
3.5 REALIZAÇÃO DA EXPERIÊNCIA
3.6 RESULTADOS
3.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS
3.7.1 GAGE R&R
3.7.2 ANÁLISE RESULTADOS EXPERIMENTAIS
3.7.3 SINTESE DOS RESULTADOS

3 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

Neste capítulo é apresentado o produto e o processo produtivo definido pela empresa. Os materiais utilizados são referenciados apenas com a função desempenhada no produto, as quantidades e concentração das matérias primas são omitidas por razões de confidencialidade.
O desenvolvimento do estudo inicia-se com a identificação do problema em estudo. O problema em estudo foi detetado na fase de produção piloto, dos blocos com a maior dimensão. Neste capítulo é apresentado em detalhe o problema em estudo, o desenvolvimento e aplicação do método de Taguchi neste contexto. Para o tratamento de resultados foram utilizadas as ferramentas, *Excel e Minitab 18*.

3.1 PRODUTO

Um substituto ósseo é "todo o material de origem humana, animal, vegetal ou sintético, destinado à implantação no homem com a perspetiva de uma reconstituição do capital ósseo, para o reforço de uma estrutura óssea ou para o preenchimento de uma perda de substância óssea de origem traumática ou ortopédica" (Gutierres et al., 2005).
Os materiais utilizados como substitutos ósseos são (Nather, 2005):

Materiais osteogénicos – estes materiais são constituídos por tecido celular com capacidade de se diferenciar em tecido ósseo. Estes materiais são o osso esponjoso, osso cortical ou aspirado de medula óssea do próprio indivíduo, constituindo um autoenxerto.

Materiais osteoindutores – são materiais que potenciam a diferenciação de células indiferenciadas em osteoblastos.

Materiais osteocondutores – são materiais que se comportam como substrato para a deposição óssea, sendo absorvido e substituído por tecido ósseo. Neste tipo de materiais estão incluídos os biocerâmicos.

Os cerâmicos são materiais cristalinos refratários inorgânicos, duros e frágeis, com elevada temperatura de fusão. São materiais biocompatíveis, pois apresentam uma composição química muito semelhante ao substrato fisiológico.
O biocerâmico usado para a produção de substitutos ósseo é o Beta trifosfato de cálcio (β-TCP) (Mistry & Mikos, 2005).
O β-TCP é um material biocerâmico usado como substituto ósseo com caraterísticas como, boa compatibilidade, osteocondutividade, biodegradação e resistência mecânica (Narayan, 2009). Clinicamente são usadas diversas forma e tamanhos de acordo com a

aplicação. A Figura 10 apresenta a variedade de tamanhos e de blocos e grânulos de substitutos ósseos para diversas aplicações clínicas.

Figura 10 - Diferentes tamanhos de blocos e grânulos de substitutos ósseos (Narayan, 2009)

Estes cerâmicos são porosos e com poros interconectados, esta caraterística é essencial para o processo de reabsorção do substituto no organismo. A distribuição dos poros situa-se entre os 300 a 1250µm. A taxa de reabsorção pode assim ser controlada desta forma.

As caraterísticas dos DM biocerâmicos como o β-TCP são definidas de acordo com a ISO 13779:2018. A Tabela 20, apresenta os valores definidos para as caraterísticas relevantes do produto (ISO 13779, 2018):

Tabela 20 – Critérios do substituto ósseo (adaptado) (ISO 13779, 2018)

Critério		
Fases cristalinas		100%<β-TCP<95%
Contaminantes Metálicos	Arsénio	<3ppm
	Cádmio	<5ppm
	Mercúrio	<5ppm
	Chumbo	<30ppm
	Metais pesados	<50ppm
Resistência mecânica		>1,5 MPa
Porosidade		75%<Porosidade<85%

3.2 PROCESSO PRODUTIVO

A produção de blocos de substituto ósseo exige vários processos até ao produto final. As matérias primas necessárias são o β-TCP, desfloculante, ligante, água e veículo orgânico (espuma de poliuretano). Para estas matérias primas foi desenvolvida uma receita, de acordo com as caraterísticas de porosidade e resistência mecânica definidas da ISO 13779.

O processo produtivo de biocerâmicos de β-TCP divide-se nos seguintes processos, Figura 11:

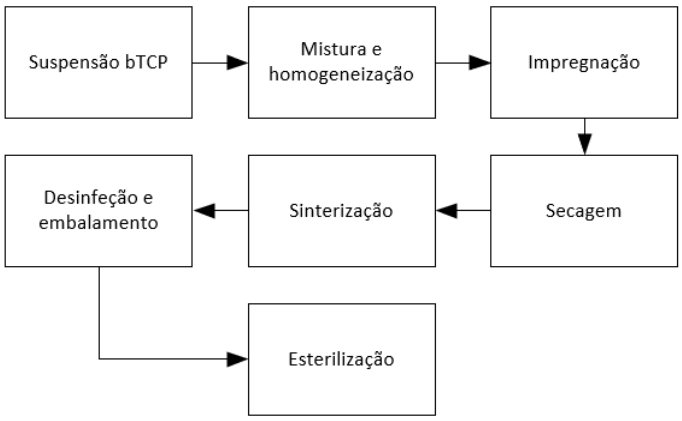


Figura 11 – Processo produtivo do substituto ósseo em estudo

Suspensão de β-TCP – Nesta fase do processo é preparada a suspensão que contém os reagentes nas quantidades estabelecidas. Para a produção do substituto ósseo é utilizado o biocerâmico β-TCP, água, ligante e desfloculante, Figura 12.

Figura 12 – Suspensão de β-TCP

Mistura e homogeneização – A suspensão do processo é misturada e homogeneizada, garantindo a distribuição homogénea dos sólidos na água. Este processo é realizado com o recurso a agitação mecânica (moinho), e bolas de zircónia no interior dos recipientes de mistura, Figura 13.

Figura 13 – Mistura e homogeneização

Impregnação – Este processo consiste na replicação de espuma polimérica (espuma poliuretano). Ou seja, a suspensão β-TCP é introduzida no interior da espuma com recurso a agitação mecânica (moinho) e compressão da espuma através de bolas de zircónia. Após a mistura e homogeneização é adicionada espuma de poliuretano, no mesmo recipiente e bolas de zircónia e acionada a agitação mecânica, Figura 14.

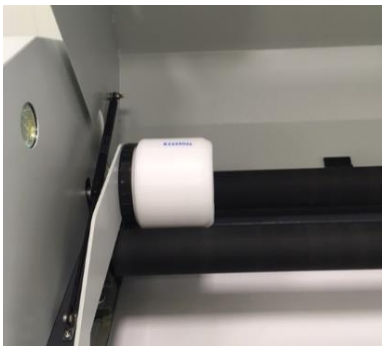


Figura 14 –Impregnação

Secagem – Nesta fase a espuma polimérica encontra-se impregnada com a suspensão. A secagem tem como objetivo a eliminação da água presente no interior dos blocos impregnados, este processo realiza-se numa estufa, Figura 15.

Figura 15 – Secagem

Sinterização – é um processo térmico no qual ocorre a queima da espuma de poliuretano à temperatura de 400°C, quando é atingida a temperatura de 600°C inicia-se a queima de voláteis orgânicos. Outra etapa importante no processo térmico ocorre próximo dos 1150°C provocando alterações reológicas do β-TCP. Neste processo a queima da espuma de poliuretano permite que o β-TCP adquira da forma e porosidade da espuma, servindo de molde para a forma final do produto,

.

Figura 16 – Sinterização

Desinfeção e embalamento – Processo que tem como objetivo a desinfeção do produto para o embalamento em dupla manga.

Esterilização – A utilização deste produto exige a esterilização. A esterilização é realizada por feixe de eletrões (raios gama).

3.3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

No contexto da empresa, após desenvolvido o produto e processo produtivo iniciaram-se as produções piloto para blocos de substituto ósseo com diferentes dimensões. Iniciaram-se diversas análises laboratoriais para a verificação dos requisitos legais e normativos do produto. Nesta fase verificou-se, nos blocos de maior dimensão, a existência de um espaço vazio no interior do bloco. Nesta fase o produto percorreu todo o processo produtivo até terminar o processo de sinterização. A Figura 17, apresenta o vazio detetado no interior dos blocos de substitutos ósseos.

Figura 17 – Blocos com vazios no interior

Para analisar o problema detetado, numa fase inicial desenvolveu-se um brainstorming com elementos da qualidade do produto, design e desenvolvimento e produção. Desta forma, foi identificado o processo de impregnação como a fase produtiva em que ocorre a formação de vazio no interior do bloco. Ou seja, no processo de impregnação a suspensão de β–TCP é introduzida no interior da espuma de poliuretano. Neste processo caso a suspensão de β–TCP não seja introduzida em todo o interior da espuma de poliuretano são formadas áreas com apenas espuma de poliuretano. No processo seguinte as espumas impregnadas são colocadas numa estufa, para a retirada por calor, da água impregnada no bloco. Obtidos blocos secos, são sinterizados num ciclo térmico, permitindo a queima (desaparecimento) de toda a espuma de poliuretano. Após a sinterização os blocos são formados apenas de β–TCP que adquirem a forma da espuma de poliuretano. A espuma de poliuretano é usada como molde final do produto. Em áreas da espuma cuja suspensão não impregnou após a queima da espuma são formadas áreas vazias. Determinada a fase do processo produtivo desenvolveu-se um diagrama causa-efeito (ou Ishikawa) (Anexo C) para estudo do processo de impregnação, Figura 18.

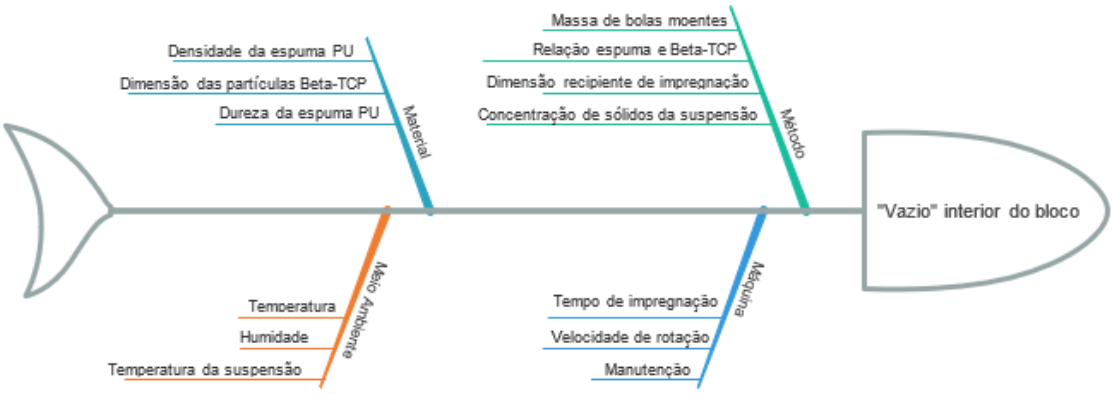


Figura 18 – Ishikawa para o problema de "vazio" no interior do bloco

Os parâmetros envolvidos no processo de impregnação podem ser classificados de acordo com as seguintes categorias:

- **Material**
  - Densidade da espuma PU
  - Dimensão das partículas β –TCP
  - Dureza da espuma PU
- **Método**
  - Massa de bolas moentes
  - Relação espuma PU e β –TCP
  - Dimensão do recipiente de impregnação
  - Concentração de sólidos da suspensão
- **Máquina** (Moinho Rolos)
  - Tempo de impregnação
  - Velocidade de rotação
  - Manutenção
- **Meio Ambiente**
  - Temperatura
  - Humidade
  - Temperatura da suspensão

3.4 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO – MÉTODO DE TAGUCHI

Identificados os parâmetros de influência através do diagrama de Ishikawa procedeu-se à seleção dos parâmetros para incluir no estudo. Os parâmetros selecionados para o estudo são:

- Relação da espuma PU e β-TCP
- Concentração de sólidos na suspensão
- Tempo de impregnação
- Velocidade de moinho de impregnação
- Dimensão do recipiente de impregnação
- Massa de compressão das bolas

Estudos desenvolvidos anteriormente permitiram selecionar a espuma de PU de acordo com a dimensão dos poros do bloco de substituto ósseo. Assim, foi determinado manter a espuma selecionada anteriormente. O problema em estudo é analisado pela primeira vez após a sua deteção. Assim, decidiu-se a análise dos todos os fatores dos quais não estão conhecidos a influência no produto final. Os fatores ambientais não foram considerados para o estudo. As produções piloto foram todas produzidas sob as mesmas condições ambientais, outras produções piloto com blocos de diferentes dimensões também foram produzidas sob as mesmas condições sem a existência de vazios no interior dos blocos.

3.4.1 CLASSIFICAÇÃO DO TIPO DE RESPOSTA

A resposta para a caraterística da qualidade em estudo pode ser classificada como uma variável contínua, do tipo Maior-é-Melhor. Esta resposta corresponde à massa do bloco após a sinterização. No entanto, a massa do bloco sinterizado não permite avaliar a distribuição da suspensão do β-TCP na espuma de PU. Assim, com o objetivo de ultrapassar esta limitação definiu-se também como resposta da qualidade a área do vazio nos blocos. Para avaliar a existência de "vazios" nos blocos foram realizados ensaios destrutivos dos blocos, determinada a largura e comprimento do "vazio". Esta análise é também uma variável contínua, mas do tipo Menor-é-Melhor. Para ambas as respostas, é efetuado um estudo individual. As respostas da qualidade em estudo não são o método ótimo para a avaliação da distribuição dos poros no interior do bloco de substituto ósseo. Para uma avaliação mais correta seria necessário recorrer a uma análise através de micro tomografia computorizada. No entanto, por razões financeiras não foi possível aceder a esta técnica.

3.4.2 SELEÇÃO DOS NÍVEIS DOS FATORES E INTERAÇÕES

Após a seleção dos fatores em estudo procedeu-se à seleção dos níveis dos fatores, Tabela 21 e interações.

Tabela 21 – Níveis dos fatores

	Fatores	Nível 1	Nível 2	Unidades
A	Relação espuma PU e β–TCP	1:27	1:28	g:g
B	Concentração de sólidos na suspensão	67%	68%	%
C	Interação AB			
D	Tempo de impregnação	10	15	min
E	Velocidade de moinho de impregnação	100	150	rpm
F	Volume do frasco de impregnação	500	1000	ml
G	Massa de compressão da impregnação	2M	3M	g

A interação entre os fatores, relação espuma de PU e β–TCP e a concentração de sólidos na suspensão não é clara. Assim optou-se por considerar a Interação AB.
AxB = Relação da espuma PU e β–TCP x Concentração de sólidos na suspensão.

3.4.3 ESCOLHA DA MATRIZ ORTOGONAL

A alocação dos fatores matriz ortogonal é obtida de acordo com o seguinte procedimento:

Cálculo dos graus de liberdade
Graus de liberdade dos fatores: A, B, D, E, F, G
F_{GL}= nº Fatores x (nº Niveis-1)
F_{GL} = 6 x (2-1) = 6

Graus de liberdade da interação: C – interação A x B
I_{GL}= nº interações x (GL fator A x GL fator B)
I_{GL} = 1 x (2-1) x (2-1) = 1

Número total de graus de liberdade:
T(GL)= F_{GL}+I_{GL}
T_{GL} = 6 + 1 = 7

Seleção matriz ortogonal
A seleção da matriz ortogonal é determinada pelos graus de liberdade totais, indicando qual a menor matriz possível. Através da aplicação da seguinte formula: L_x onde x ≥ (T_{GL} +1). Ou seja, a matriz selecionada corresponde a L_8, 8 ≥ (7+1) Tabela 22.

Tabela 22 – Matriz L_8

L8	Fatores e Níveis						
Ensaio Nº	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Alocação dos fatores e interações às colunas da matriz ortogonal L_8 determinou-se através dos grafos lineares que corresponde às necessidades da experiência, Figura 19.

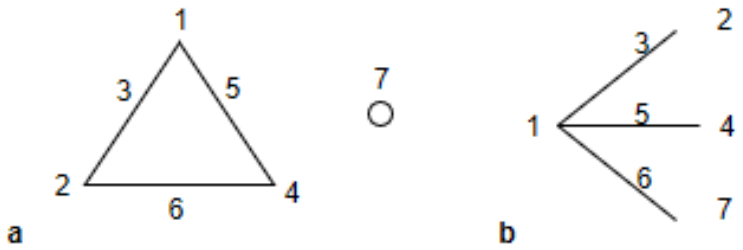


Figura 19 – Grafos Linear L_8

Logo, a alocação dos fatores na matriz ortogonal L_8 com 6 fatores A, B, D, E, F, G e C a Interação AB, apresenta-se na Tabela 23.

Tabela 23 – Alocação dos fatores à matriz L_8

L8	Fatores e Níveis						
Ensaio Nº	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

3.5 REALIZAÇÃO DA EXPERIÊNCIA

Para realizar os 8 ensaios planeados na matriz L_8 definiu-se apenas uma réplica devido ao elevado custo das matérias primas. A sequência de realização das experiências foi definida aleatoriamente, tendo sido executada na seguinte ordem: 5,1,7,2,8,3,6,4. Para cada ensaio são processadas 6 unidades (blocos) pois corresponde à unidade mínima de lote produtivo. A alocação dos fatores e níveis na matriz L_8, apresenta-se na Tabela 24:

Tabela 24 – Matriz L8 com alocação de fatores, níveis e sequência dos ensaios

L8		Fatores e Níveis						
Ensaio Nº	Sequência	A Relação espuma PU/βTCP	B Concentração sólidos	C Interação AB	D Tempo impregnação	E Velocidade moinho	F Volume frasco	G Massa compressão
1	2	1;27	67	1	10	100	500	2M
2	4	1;27	67	1	15	150	1000	3M
3	6	1;27	68	2	10	100	1000	3M

4	8	1;27	68	2	15	150	500	2M
5	1	1;28	67	2	10	150	500	3M
6	7	1;28	67	2	15	100	1000	2M
7	3	1;28	68	1	10	150	1000	2M
8	5	1;28	68	1	15	100	500	3M

Os ensaios foram realizados todos no mesmo dia e pelo mesmo operador.

3.6 RESULTADOS

As caraterísticas de qualidade em estudo, massa e área foram obtidas através da utilização de uma balança e paquímetro. Os resultados para a massa dos blocos são apresentados na Tabela 25 (em gramas):

Tabela 25 – Resposta para a massa

Ensaio	A	B	C	D	E	F	G	M1	M2	M3	M4	M5	M6
1	1	1	1	1	1	1	1	12,76	10,24	10,58	12,69	12,97	12,24
2	1	1	1	2	2	2	2	12,98	12,95	13,32	11,58	12,87	11,35
3	1	2	2	1	1	2	2	11,75	11,47	12,15	12,92	13,02	11,78
4	1	2	2	2	2	1	1	11,34	13,54	13,10	12,17	12,58	11,45
5	2	1	2	1	2	1	2	11,98	11,71	11,55	13,14	12,55	12,21
6	2	1	2	2	1	2	1	11,94	12,13	12,20	12,75	12,64	12,06
7	2	2	1	1	2	2	1	11,12	12,76	12,24	11,99	12,62	12,32
8	2	2	1	2	1	1	2	11,46	11,93	12,13	11,83	12,18	12,23

Os resultados obtidos para a área do vazio no interior do bloco são apresentados na Tabela 26 (mm^2):

Tabela 26 – Resposta para a área

Ensaio	A	B	C	D	E	F	G	A1	A2	A3	A4	A5	A6
1	1	1	1	1	1	1	1	40,56	17,28	0,00	20,65	24,08	0,00
2	1	1	1	2	2	2	2	0,00	0,00	32,25	0,00	0,00	0,00
3	1	2	2	1	1	2	2	18,70	0,00	0,00	33,14	79,23	20,80
4	1	2	2	2	2	1	1	0,00	19,45	34,75	0,00	0,00	0,00
5	2	1	2	1	2	1	2	49,83	0,00	0,00	72,23	52,06	21,61
6	2	1	2	2	1	2	1	31,50	27,26	26,46	0,00	0,00	32,88
7	2	2	1	1	2	2	1	0,00	0,00	47,96	60,88	73,18	44,28
8	2	2	1	2	1	1	2	36,54	16,12	0,00	18,72	0,00	7,48

3.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.7.1 GAGE R&R

A análise de resultados obtidos é precedida da análise R&R para garantir que a variabilidade do sistema de medição é desprezável em relação à variabilidade total do processo de impregnação. Foram estudadas 10 amostras, com 3 operadores, com 3 repetições, para a balança e paquímetro. Este estudo deve garantir que a variabilidade do sistema de medição é desprezável em relação à variabilidade total do processo impregnação.

O equipamento em estudo para a ”pesagem” foi uma balança Sartorius 6202i (Figura 20), com capacidade máxima de 3,20g e resolução de 0,01g.

Figura 20 – Balança Sartorius

As medições foram efetuadas de forma aleatória. No anexo D estão apresentados os valores das medições.

O tratamento dos resultados foi desenvolvido no software *Minitab*. Os resultados Gage R&R para as medições é apresentado na Tabela 27:

Tabela 27 – Resultados Gage R&R

Fonte	Variação estudo	% Variação do estudo
Total de R&R da medição	0,02	1,28
Repetibilidade	0,02	1,26
Reprodutibilidade	0,00	0,25
Peça a peça	1,22	99,99
Variação Total	1,22	100,00

Categorias distintas = 109

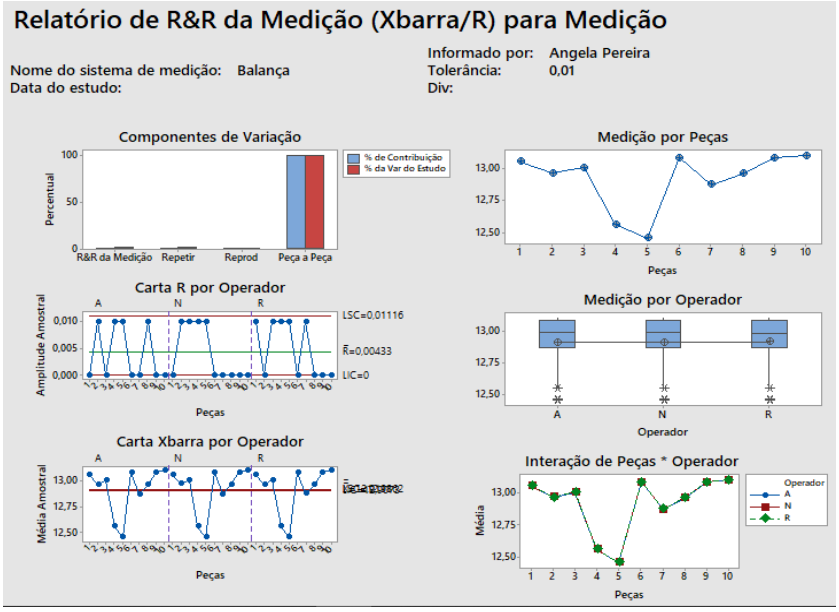


Figura 21 – Gage R&R para a medição

Através da análise da Tabela 27, verifica-se que a contribuição da balança é 1,28%, ou seja, inferior a 10%, (valor a partir do qual se considera o sistema de medição aceitável, entre 0 e 10%). Também a deteção de 109 categorias distintas, ou seja, superior a 5, isto indica qua a balança apresenta capacidade de distinguir diferentes peças. Os resultados obtidos indicam que a balança não influencia com significado os resultados das medições.

Também para o equipamento de medição paquímetro foi desenvolvido um estudo semelhante ao da balança. O equipamento em estudo é um paquímetro digital VWR com resolução 0,01mm, Figura 22.

Figura 22 – Paquímetro

O tratamento dos resultados Gage R&R para as medições é apresentado na Tabela 28:

Tabela 28 – Resultados Gage R&R

Fonte	Variação estudo	% Variação do estudo
Total de R&R da medição	0,10	1,35
Repetibilidade	0,09	1,25
Reprodutibilidade	0,04	0,52
Peça a peça	7,58	99,99
Variação Total	7,58	100,00

Categorias distintas = 104

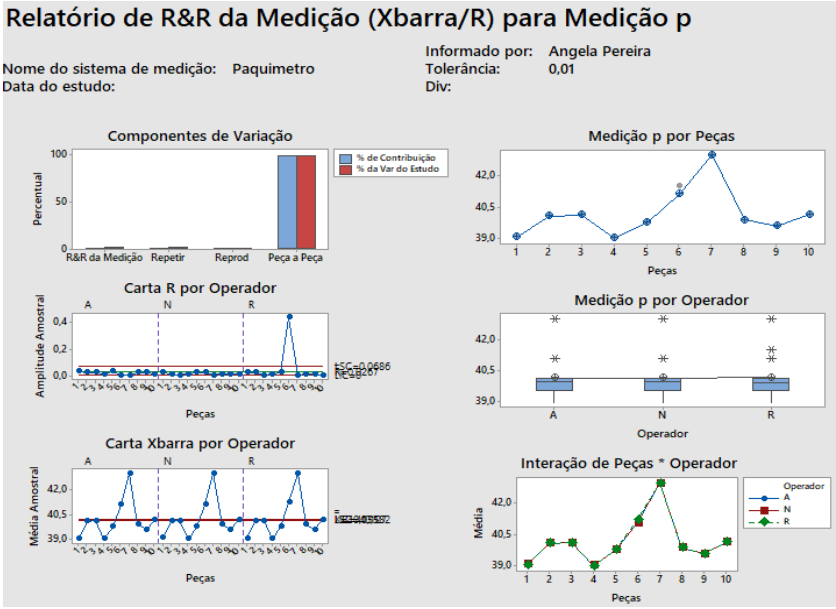


Figura 23 – Gage R&R para a medição

Para o instrumento paquímetro a análise gage R&R da Tabela 28, verifica-se que a contribuição do paquímetro para a variação das medições é de 1,35% (inferior a 10%). O número de categorias distintas é de 104, indicando o paquímetro e os diferentes operadores não influenciam a medição.

3.7.2 ANÁLISE RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Recolhidos os resultados da experiência desenvolve-se a análise dos resultados de acordo com o método de Taguchi. Recorrendo à análise gráfica de efeito principal de cada parâmetro complementado com a análise de variância. Nesta fase a análise de variância desenvolveu-se em duas fases. Na primeira fase são analisados os resultados da experiência, tratando as repetições dos ensaios como replicações. Na segunda fase, da análise de variância, são analisados o S/R com o recurso a *pooling up* dos fatores. Dado a ausência de estudos anteriores do processo de impregnação, foi definido o nível de confiança de 90% para a análise dos resultados experimentais.
Para desenvolver as análises indicadas recorre-se à ferramenta *Minitab*.

MASSA

Com o propósito de identificar os fatores influentes na variação em torno da média da massa, segundo a caraterística da qualidade Maior-é-Melhor, calculou-se a diferença da resposta de cada nível em todos os fatores (Tabela 29) e representação gráfica (Figura 24) dos níveis para os fatores em estudo.

Tabela 29 – Respostas para as médias da massa

Nível	A Relação PU/βTCP	B Concentração sólidos	C Interação AB	D Tempo impregnação	E Velocidade moinho	F Volume frasco	G Massa compressão
1	12,24	12,22	12,14	12,12	12,09	12,11	12,18
2	12,15	12,17	12,26	12,28	12,31	12,29	12,21
Diferença	0,09	0,05	0,12	0,16	0,22	0,18	0,03
Ranking	5	6	4	3	1	2	7

A Figura 24 sintetiza os resultados obtidos na Tabela 29 graficamente.

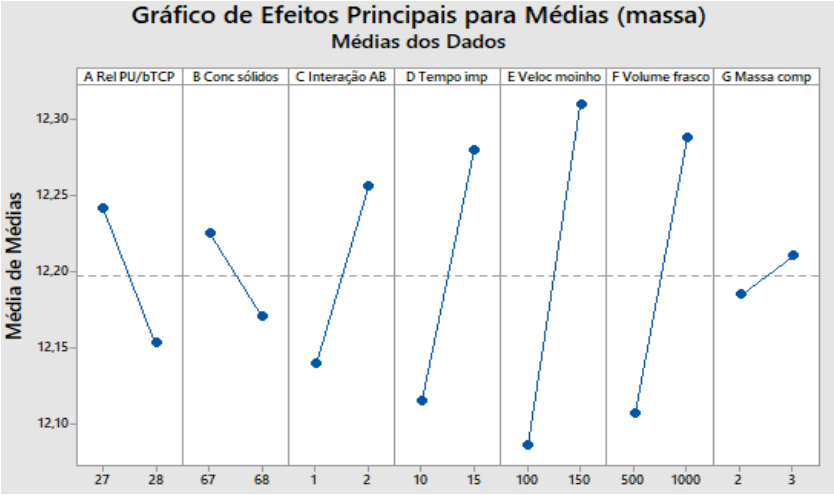


Figura 24 – Efeitos médios dos fatores

A velocidade de impregnação do moinho de rolos é o fator que apresenta a maior diferença entre os níveis 1 e 2, e consequentemente com a primeira posição no ranking de influência dos fatores, o volume do frasco, o tempo de impregnação e a Interação AB ocupam a segunda, terceira e quarta posições do ranking. Os restantes fatores (massa de compressão, concentração de sólidos e a relação espuma PU/β-TCP) apresentam diferenças entre os níveis 1 e 2 muito baixas (0,04 e 0,02), indicando que a variação dos níveis não apresenta muita influência nas respostas obtidas.

Tal como referido no ponto 2.3.1 ANÁLISE GRÁFICA a seleção dos fatores significativos com recurso da análise gráfica é determinada pelo número de graus de liberdade do arranjo ortogonal (AO). Os fatores significativos correspondem a metade dos graus de liberdade do AO. No estudo realizado o arranjo ortogonal apresenta 7 graus de liberdade, assim são considerados fatores significativos, os 4 fatores com melhor posição no ranking, (velocidade do moinho, volume do frasco, tempo de impregnação e a Interação AB). A resposta da caraterística da qualidade massa é do tipo Maior-é-Melhor, a seleção dos níveis dos 4 fatores significativos é:

E – Velocidade de moinho de impregnação: 150 rpm

F – Volume do frasco de impregnação: 1000 ml

D – Tempo de impregnação: 15 minutos

C – Interação AB: A_1:27 e B_2:68

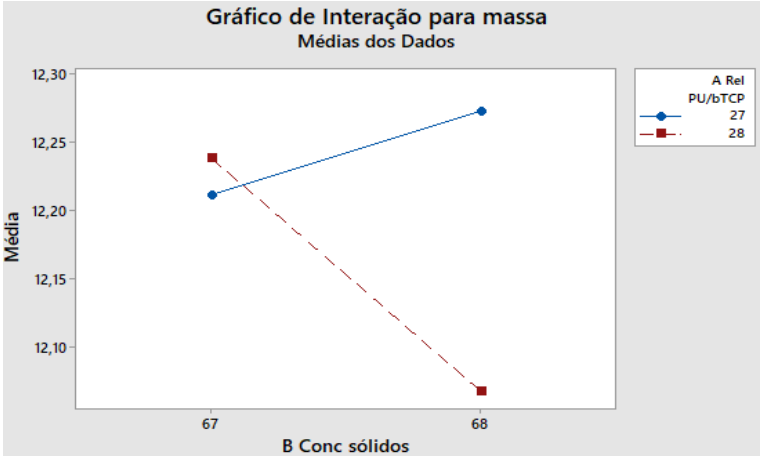


Figura 25 – Interação AB da massa

Para o gráfico da interação em estudo, relação da espuma PU/β-TCP x concentração de sólidos na suspensão β-TCP, Figura 25, é possível verificar que existe interação uma vez que as retas apresentam declives opostos.

A análise das respostas desenvolvidas, exclusivamente, através do método gráfico é insuficiente, nesse sentido a análise dos resultados foi complementada através da análise da variância (ANOVA).
Apesar da execução da experiência com apenas uma réplica, as 6 amostras recolhidas em cada ensaio foram tratadas como réplicas para a análise da variância. A análise dos resultados experimentais iniciou-se com uma análise de variância para todas as observações obtidas.

Tabela 30 – Análise de variância para os resultados da massa

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Contribuição (%)
A Relação espuma PU/βTCP	1	0,095	0,0945	0,18	0,42
B Concentração de sólidos	1	0,036	0,0358	0,07	0,16
C Interação AB	1	0,162	0,1622	0,31	0,72
D Tempo de impregnação	1	0,335	0,3251	0,62	1,44
E Velocidade impregnação	1	0,601	0,6008	1,15	2,67
F Volume do frasco	1	0,394	0,3942	0,75	1,75
G Massa de compressão	1	0,008	0,0078	0,01	0,03
Erro	40	20,918	0,5230		92,81
Total	47	22,54			100,00

A Tabela 30, permite constatar que os resultados experimentais apresentam um somatório dos quadrados entre grupos (dentro dos ensaios), com a contribuição de 92,81% muito superior ao somatório dos quadrados entre ensaios, com uma

contribuição de 7,19%. Estes resultados indicam que as massas variam mais para o mesmo ensaio em comparação com a variação entre ensaios, Figura 26. Este resultado indica que existem fatores significativos que não foram contemplados no estudo. Tal como constatado através da análise de variância da Tabela 30, nenhum fator estudado se apresenta significativo ($F_{(0,10;1;40)}$ = 2,835).

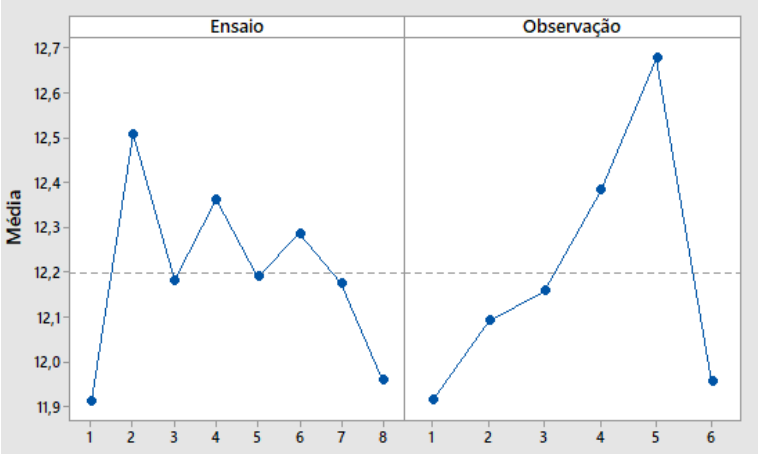


Figura 26 – Efeito da massa, ensaio vs observações

Apesar dos resultados obtidos para a massa apresenta-se a análise de variância para a razão S/R do tipo Maior-é-Melhor. Atendendo que a experiência parte de uma matriz saturada e sem replicações, Taguchi indica o *pooling up* dos fatores com menor contribuição.

O cálculo da razão sinal-ruído segundo a caraterística Maior-é-Melhor foi obtido através da equação:

$$(S/N)_i = -10\log\left[\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{1}{y_{ij}^2}\right]$$

Na Tabela 31 são apresentados os valores da razão S/R para os fatores em estudo nos níveis 1 e 2 dos fatores, estabelecida a diferença para os níveis 1 e 2 e atribuído a ranking dos fatores. A representação gráfica da razão S/R desenvolvida na Tabela 31 apresenta-se na Figura 27.

Tabela 31 – Respostas Sinal-Ruído da massa do tipo maior é melhor

Nível	A Relação PU/βTCP	B Concentração sólidos	C Interação AB	D Tempo impregnação	E Velocidade moinho	F Volume frasco	G Massa compressão
1	21,69	21,69	21,63	21,62	21,60	21,61	21,66
2	21,68	21,68	21,74	21,75	21,76	21,76	21,71
Diferença	0,02	0,02	0,11	0,14	0,16	0,15	0,04
Ranking	7	6	4	3	1	2	5

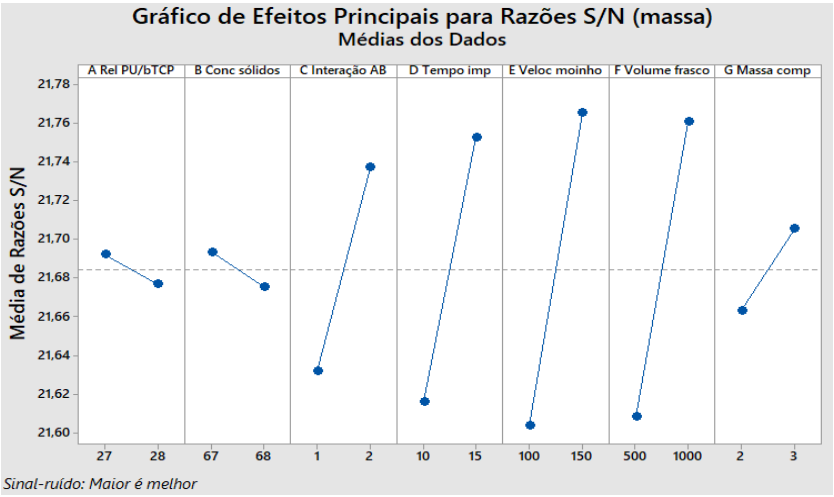


Figura 27 – Efeito do S/R dos fatores

A análise gráfica para a razão S/R da caraterística da qualidade massa do tipo Maior-é-Melhor coincide com a análise gráfica para o efeito das médias. Ou seja, a análise da Tabela 31 e Figura 27 indica que os níveis para os fatores significativos são:

E – Velocidade de moinho de impregnação: 150 rpm
F – Volume do frasco de impregnação: 1000 ml
D – Tempo de impregnação: 15 minutos
C – Interação AB: A_1:27 e B_2:68

Os resultados indicados pela análise gráfica desenvolvida anteriormente são complementados através da análise de variância ANOVA como recurso do *pooling up* dos fatores para a razão S/R. A Tabela 32 apresenta a tabela ANOVA obtida.

Tabela 32 – Análise de variância *pooling up* S/R para a massa

Fonte	Pooling	GL	SQ	QM	Valor F	Contribuição (%)
A Relação espuma PU/BTCP	Pooled	1			Pooled*	
B Concentração de sólidos	Pooled	1			Pooled*	
C Interação AB		1	0,022	0,0221	14,34	13,66%
D Tempo de impregnação		1	0,037	0,0372	24,10	22,96%
E Velocidade impregnação		1	0,052	0,0519	33,60	32,01%
F Volume do frasco		1	0,046	0,0462	29,93	28,51%
G Massa de compressão	Pooled	1			Pooled*	
Erro* (Pooled)		3	0,005	0,0015		2,86%
Total		7	0,162			100,00%

A aplicação do método *pooling up* na análise de variância para a massa permite identificar os fatores com maior contribuição para a resposta de qualidade massa. O

pooling up permite que fatores com menor contribuição sejam agregado ao erro até que um fator seja significativo. Assim o *pooling* dos fatores com menor contribuição, massa de compressão, concentração de sólidos da suspensão e relação espuma PU/β-TCP são associados ao erro. Para o valor de $F_{(0,10;1;3)}$ = 5,538 os fatores que se apresentam significativos são a velocidade de impregnação com 32,01% de contribuição, o volume do frasco com 28,51% de contribuição, o tempo de impregnação com 22,96% de contribuição e a Interação AB com 13,66%, Tabela 32. A Figura 28 apresenta o gráfico de Pareto para contribuição dos fatores analisados na ANOVA da Tabela 32. Neste gráfico os fatores significativos são apresentados com a coloração azul. Os fatores com maior contribuição são (do maior para menor): a E – velocidade do moinho, F – volume do frasco, D – tempo de impregnação e C – Interação AB. Os fatores agregados ao erro estão apresentados com a coloração cinza, e identificam os fatores não significativos (fator G – massa de compressão, B – concentração de sólidos e A – relação espuma PU/β-TCP).

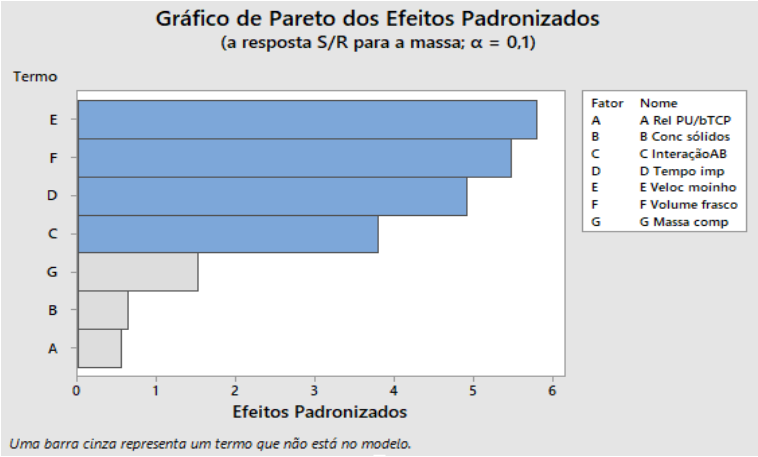


Figura 28 – Gráfico Pareto para efeito dos fatores

O fator C – Interação AB apresenta-se com a contribuição de 13,66%, no entanto o fator A e o fator B não são significativos. Este resultado indica que a contribuição da interação pode ter origem na interação entre os fatores tempo de impregnação e massa de compressão (coluna 4 e 7) ou na interação velocidade de impregnação e volume do frasco (coluna 5 e 6).

ÁREA

Para a análise da resposta área foram seguidas as etapas aplicadas ao estudo da resposta de qualidade massa. A análise à resposta área iniciou-se com o cálculo da diferença da resposta de cada nível para todos os fatores, segundo a caraterística da qualidade do tipo Menor-é-Melhor (Tabela 33) e a representação gráfica (Figura 29) dos níveis para os fatores em estudo.

Tabela 33 – Respostas para as médias da área

Nível	A Relação PU/βTCP	B Concentração sólidos	C Interação AB	D Tempo impregnação	E Velocidade moinho	F Volume frasco	G Massa compressão
1	14,20	18,69	18,33	28,19	18,81	17,98	20,88
2	25,79	21,30	21,66	11,81	21,19	22,02	19,11
Diferença	11,59	2,61	3,33	16,38	2,38	4,05	1,77
Ranking	2	5	4	1	6	3	7

A Figura 29 apresenta os resultados da Tabela 33 graficamente.

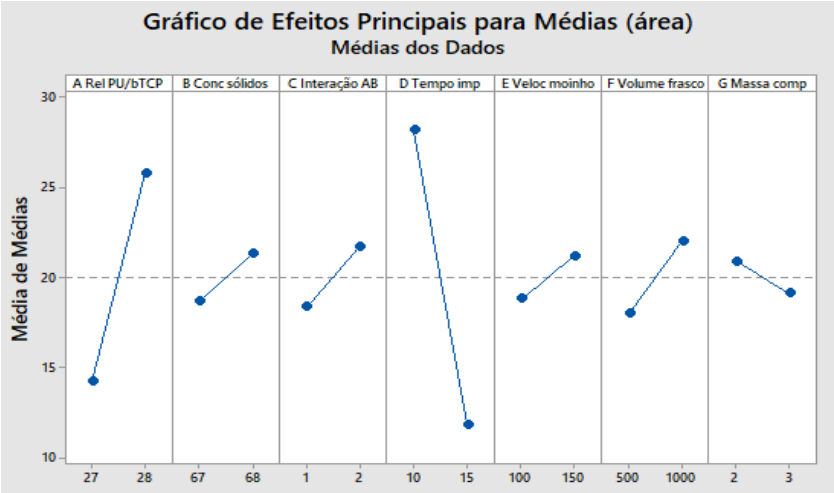


Figura 29 – Efeitos médios dos fatores

O tempo de impregnação é o fator que apresenta a maior diferença entre os níveis 1 e 2, ou seja, com a primeira posição no ranking de influência dos fatores, a relação espuma PU/β-TCP, o volume do frasco e a Interação AB ocupam a segunda, terceira e quarta posições do ranking. Os restantes fatores (concentração de sólidos, velocidade do moinho e a massa de compressão) apresentam diferenças entre os níveis 1 e 2 baixas, indicando que a variação dos níveis não apresenta muita influência nas respostas obtidas.

Tal como determinado para a caraterística de qualidade massa a seleção dos fatores significativos com o recurso à análise gráfica, os fatores significativos correspondem aos 4 fatores com melhor posição no ranking da Tabela 33. Para a resposta área os fatores significativos são a relação espuma PU/β-TCP, o volume do frasco e a Interação AB.

D – Tempo de impregnação: 15 minutos
A – Relação espuma PU/β-TCP: 27
F – Volume do frasco: 500 ml
C – Interação AB: A_1:27 e B_1:67

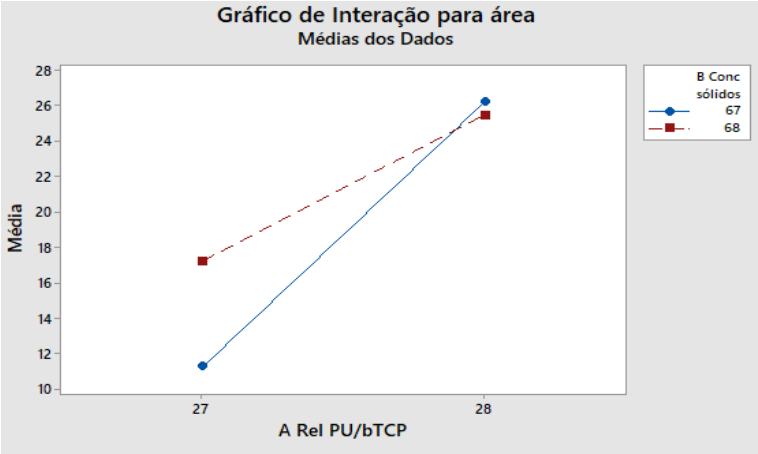


Figura 30 – Interação AB área

Para o gráfico de interação em estudo, relação da espuma PU/β-TCP x concentração de sólidos na suspensão β-TCP, Figura 30, é possível verificar que existe interação uma vez que as retas apresentam um ponto de sobreposição.

Aplicando o mesmo tratamento dos resultados à caraterística área, também é desenvolvida a análise de variância. A ANOVA desenvolvida inicialmente trata as respostas de 6 amostras recolhidas em cada ensaio como réplicas para a o estudo da significância dos resultados, Tabela 34.

Tabela 34 – Análise de variância para a resposta área

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Contribuição (%)
A Relação espuma PU/βTCP	1	1611,42	1611,42	3,41	6,64
B Concentração de sólidos	1	81,33	81,33	0,17	0,34
C Interação AB	1	133,62	133,62	0,28	0,55
D Tempo de impregnação	1	3220,30	3220,30	6,81	13,27
E Velocidade impregnação	1	68,00	68,00	0,14	0,28
F Volume do frasco	1	196,43	196,43	0,42	0,81
G Massa de compressão	1	37,38	37,38	0,08	0,15
Erro	40	18915,6	472,89		77,96
Total	47	24264,0			100,00

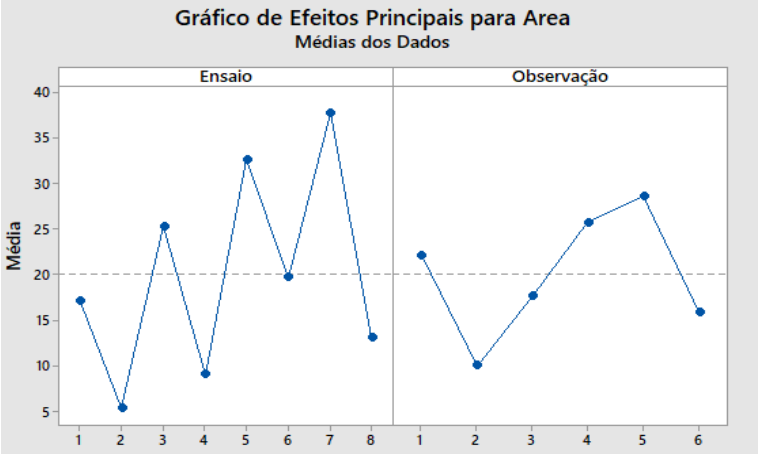


Figura 31 – Efeito da área observações vs ensaios

Através da Tabela 34, verifica-se que os resultados experimentais apresentam um somatório dos quadrados entre grupos (dentro dos ensaios), com contribuição de 77,96%, muito superior ao somatório dos quadrados entre ensaios, com contribuição de 22,04%. Estes resultados indicam que a resposta área varia mais para o mesmo ensaio em comparação com a variação entre ensaios, Figura 31. Este resultado indica que existem fatores com significância que não foram contemplados no estudo. Tal como constatado através da análise de variância da Tabela 34, apenas os fatores tempo de impregnação e relação espuma PU/β-TCP se apresentam significativos ($F_{(0,10;1;40)}$ = 2,835).

Também para a resposta área foi desenvolvida a análise de variância com o recurso ao *pooling up* dos fatores com menor contribuição. Apesar de análise ANOVA efetuada para todas as observações indicarem que os fatores tempo de impregnação e relação espuma PU/β-TCP se apresentam significativos o recurso ao *pooling up* é desenvolvido, pois a experiência possui uma matriz saturada e sem replicações.

O cálculo para os valores da razão S/R segundo a caraterística Menor-é-Melhor foi obtida através da equação:

$$(S/N)_i = -10\log\left[\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} y_{ij}^2\right]$$

Tabela 35 – Respostas Sinal-Ruído da área do tipo menor é melhor

Nível	A Relação PU/βTCP	B Concentração sólidos	C Interação AB	D Tempo impregnação	E Velocidade moinho	F Volume frasco	G Massa compressão
1	-26,22	-27,39	-27,00	-31,08	-27,79	-27,24	-28,07
2	-29,74	-28,56	-28,95	-24,88	-28,16	-28,72	-27,88
Diferença	3,52	1,17	1,95	6,19	0,37	1,48	0,19
Ranking	2	5	3	1	6	4	7

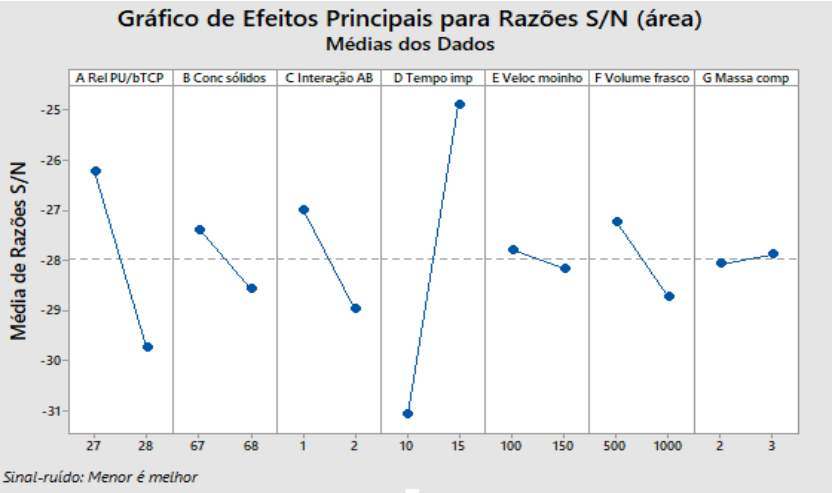


Figura 32 – Efeitos do S/R dos fatores (área)

A análise gráfica para a razão S/R da caraterística da qualidade área do tipo Menor-é-Melhor coincide com a análise gráfica para o efeito das médias. Ou seja, a análise da Tabela 35 e Figura 32 indica que os níveis para os fatores significativos são:

D – Tempo de impregnação: 15 minutos
A – Relação espuma PU/β-TCP: 27
F – Volume do frasco: 500 ml
C – Interação AB: A_1:27 e B_1:67

Os resultados da Tabela 36 apresentam a análise de variância *pooling up* para a caraterística de qualidade área, do tipo Menor-é-Melhor.

Tabela 36 – Análise de variância *pooling up* S/R para a área

Fonte	Pooling	GL	SQ	QM	Valor F	Contribuição (%)
A Relação espuma PU/BTCP		1	24,846	24,8458	142,52	21,29%
B Concentração de sólidos		1	2,741	2,7407	15,72	2,35%
C Interação AB		1	7,638	7,6380	43,81	6,55%
D Tempo de impregnação		1	76,739	76,7395	440,19	65,77%
E Velocidade impregnação	Pooled	1			Pooled*	
F Volume do frasco		1	4,372	4,3720	25,08	3,75%
G Massa de compressão	Pooled	1			Pooled*	
Erro* (Pooled)		2	0,349	0,1743		0,30%
Total		7	116,685			100,00%

O *pooling up* permite que fatores com menor contribuição sejam agregado ao erro até que um fator seja significativo. Para a caraterística de qualidade área a análise de variância efetuada para todas as observações indicou a existência de fatores significativos (tempo de impregnação e relação espuma PU/β-TCP). Através do *pooling*

up desenvolvido na Tabela 36 os fatores com menor contribuição são agregados ao erro (massa de compressão e velocidade do moinho). Para $F_{(0,10;1;2)} = 8,526$ os fatores que se apresentam significativos são a relação espuma PU/β-TCP com a contribuição de 21,29%, a concentração de sólidos na suspensão contribui com 2,35%, a Interação AB com contribuição de 6,55%, o tempo de impregnação é o fator com maior contribuição com 65,77% e o volume do frasco com 3,75%, Tabela 36. A Figura 33 apresenta o gráfico de Pareto para a contribuição dos fatores estudados na ANOVA da Tabela 36. Neste gráfico os fatores significativos (azul) (maior para menor) são: D – tempo de impregnação, A – relação espuma PU/β-TCP, C – Interação AB, F – volume do frasco e B – concentração de sólidos. Os fatores agregados ao erro (cinza) são a velocidade de impregnação e a massa de compressão.

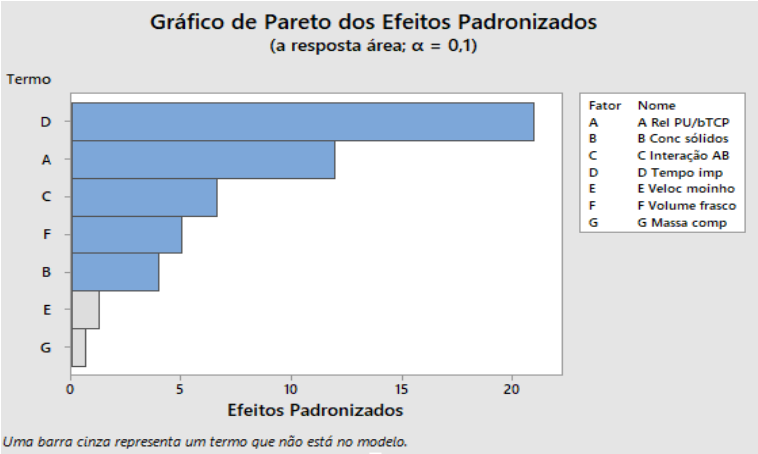


Figura 33 – Gráfico Pareto para efeito dos fatores

3.7.3 SÍNTESE DOS RESULTADOS

Por forma a simplificar a análise dos resultados obtidos para a resposta massa e área apresentam-se uma síntese dos resultados.

Para a resposta de qualidade massa (Maior-é-Melhor) através da análise gráfica é possível verificar que os fatores velocidade de impregnação, volume de frasco e tempo de impregnação e Interação AB são os fatores com maior diferença entre os níveis 1 e 2, e assim maior significado para a resposta massa. No entanto, a avaliação dos resultados através da análise de variância para as respostas obtidas nos ensaios verifica-se que nenhum fator se apresenta significativo. Isto indica que os resultados obtidos não são justificados pelos fatores em estudo. Ou seja, o processo de impregnação pode estar sob a influência de fatores que não foram identificados no desenvolvimento do estudo, uma vez que o estudo de R&R para o sistema de medição se mostrou capaz. Apesar destes resultados desenvolveu-se a análise de variância para a razão S/R da resposta do tipo Maior-é-Melhor, identificando os fatores velocidade de impregnação, volume do frasco, tempo de impregnação e a Interação AB como fatores significativos. O fator C - Interação AB apresenta-se significativo ao contrário dos fatores A e B. Isto indica que a significância da interação do fator C pode ter origem na interação de outros fatores

como a interação entre o fator velocidade de impregnação x volume do frasco e a interação dos fatores tempo de impregnação x massa de compressão.
Para a resposta área (Menor-é-Melhor) análise gráfica identifica os fatores, relação da espuma PU/β-TCP, tempo de impregnação, volume do frasco e interação AB, são os fatores com maior diferença entre os níveis 1 e 2, ou seja, mais significativos para a resposta área. A avaliação dos resultados através da análise de variância para as respostas obtidas nos ensaios verifica-se que os fatores tempo de impregnação e relação espuma PU/β-TCP se apresentam significativos. Através da análise de variância para a razão S/R (Menor-é-Melhor) os fatores significativos são, a relação espuma PU/ β-TCP, a concentração de sólidos na suspensão, a interação AB, o tempo de impregnação e o volume do frasco.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho baseava-se no estudo do processo de impregnação, a influência dos parâmetros de impregnação no problema de qualidade "vazios".

Este objetivo foi alcançado no final do desenvolvimento deste trabalho, contribuindo para o aumento do conhecimento do processo de impregnação. A aplicação do método de Taguchi permitiu desenvolver de forma estruturada a avaliação dos parâmetros do processo, o que constituiu a primeiro estudo de desempenho do processo após a sua implementação.

A seleção dos fatores em estudo desenvolveu-se recorrendo às ferramentas de qualidade, diagrama de causa-efeito (Ishikawa) e brainstorming, de acordo com a análise multidisciplinar dos elementos da qualidade, produção e desenvolvimento. Esta abordagem permitiu a introdução de ferramentas da qualidade na resolução de problemas. Através desta abordagem dos problemas criaram-se condições para a aplicação de ferramentas da qualidade para a resolução de problemas na empresa.

Em complemento ao estudo experimental foi desenvolvido o estudo R&R para o sistema de medição. O estudo R&R para os instrumentos de medição, paquímetro e balança mostra que as medições efetuadas são apenas influenciadas pela variação da peça. Ou seja, os resultados recolhidos na realização dos ensaios são apenas influenciados pela dimensão e massa do bloco.

De acordo com o método de Taguchi foram planeados e executados ensaios desenvolvidos através da matriz de arranjos ortogonais permitindo a análise das respostas massa e área. Recolhidos os resultados para a respostas desenvolveram-se as análises gráficas dos efeitos dos fatores e análise da variância.

Para a resposta massa do bloco, a análise gráfica permitiu identificar os fatores de velocidade de impregnação, volume do frasco, tempo de impregnação e interação AB como fatores com maior impacto na resposta massa. A análise de variância para todas observações indica que a contribuição do erro é muito elevada e nenhum dos fatores em estudo se apresenta significativo. Ou seja, os resultados obtidos não são justificados pelos fatores selecionados para o estudo, indicando a possibilidade da existência de fatores com influência no processo de impregnação que não foram contemplados no estudo. Contudo, desenvolveu-se a análise de variância para a razão S/R, identificando os fatores velocidade de impregnação, volume do frasco, tempo de impregnação e a interação relação PU/β-TCP e concentração de sólidos como fatores significativos. Esta interação apresenta-se significativa ao contrário dos fatores relação PU/β-TCP e concentração de sólidos. Este resultado indica que outras interações como a interação entre o fator velocidade de impregnação/volume do frasco e a interação dos fatores tempo de impregnação/massa de compressão podem justificar a significância do fator.

Para a resposta área a análise gráfica identifica os fatores, relação da espuma PU e β-TCP, tempo de impregnação, dimensão do frasco e interação relação PU/β-TCP e concentração de sólidos, como os fatores significativos. A avaliação dos resultados através da análise de variância para as respostas obtidas verificou-se que os fatores tempo de impregnação e relação espuma PU/β-TCP se apresentam significativos. Através da análise de variância da razão S/R os fatores com significativos para a resposta são, a relação espuma PU/β-TCP, a concentração de sólidos na suspensão, a interação relação espuma PU/β-TCP e concentração de sólidos, o tempo de impregnação e o volume do frasco.
A realização deste trabalho evidência que para resultados obtidos para ambas as respostas estudadas, a massa e a área, a variabilidade é claramente superior ao efeito dos fatores significativos. Apesar deste facto são determinados fatores com relevância estatística para a resposta massa e área.

O estudo desenvolvido permitiu uma análise sistémica do processo de impregnação contribuindo para a adoção de métodos científico para o estudo de processos na empresa. Este trabalho torna evidente a contribuição dos fatores estudados, evitando as análises empíricas realizadas até ao momento do estudo, sobre a contribuição dos fatores para o processo de impregnação.

Para trabalhos futuros recomenda-se a retirada dos fatores não significativos, adicionando novos fatores não incluídos no estudo realizado. A seleção de candidatos a novos fatores para o estudo exige uma análise alargada de todos os fatores identificáveis para o processo em estudo. Novos desenhos de experiências devem incluir a replicação das experiências tornando mais evidente os efeitos importantes dos fatores.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

Aslan, N. (2010). International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS). *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)*, *2*(2), 104–111. https://doi.org/10.31873/ijeas

Bonow, V., Domingues, J., Santos, E., Binsfeld, F., Mello, F., & Isoldi, A. (2015). Análise da influência de parâmetros construtivos no funcionamento de um equipamento de infusão mecanizada. *Scientia Plena*, *11*(8), 1–10. https://doi.org/10.14808/sci.plena.2015.081307

Decreto Lei nº 145. Decreto-Lei nº145, 115 Diário da República, 1.ª série § (2009).

Ealey, L. (1994). *Quality by Design: Taguchi Methods & US Industry*. (A. Press, Ed.).

Fowlkes, W., & Creveling, C. (1995). *Engineering Methods for Robust Design. Using Taguchi Methods in Tecnology and Product Development*. (A. P. Company, Ed.) (1ª).

Günay, M., & Yücel, E. (2013). Application of Taguchi method for determining optimum surface roughness in turning of high-alloy white cast iron. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *46*(2), 913–919. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.10.013

Gutierres, M., Ascensão Lopes, M., Sooraj Hussain, N., Trigo Cabral, A., Almeida, L., & Domingos Santos, J. (2005, July). Substitutos ósseos: Conceitos gerais e estado actual. *Arquivos de Medicina*.

Infarmed. (2019).

ISO 13779. Implants For Surgery-Hydroxyapatite (2018).

Kramer, D., & Kesselheim, A. (2012). Regulation of Medical Devices in the United States and European Union. *New Engkand Journal of Medicine*, *366*, 848–855.

Krishnaiah, K., & Shahabudeen, P. (2012). *Applied Design of Experiments and Taguchi Methods*. Nova Deli.

Lopes, A., Ribeiro, J., Fernandes, M., & Fonseca, E. (2016). Determinação dos parâmetros ótimos na furação do tecido ósseo com recurso ao método de Taguchi. In *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões*.

Mistry, A., & Mikos, A. (2005). Tissue engineering strategies for bone regeneration. *Adv Biochem Eng Biotechnol.*, *94*, 1–22.

Montgomery, D. (2017). *Design and Analysis of Experiments Eighth Edition*. *Design* (Vol. 2). https://doi.org/10.1198/tech.2006.s372

Narayan, R. (Ed.). (2009). *Biomedical Materials*. New York: Springer Science. Retrieved from http://weekly.cnbnews.com/news/article.html?no=124000

Nather, A. (2005). Bone grafts and bone substitutes: basic science and clinical applications. *World Scientific Publishing,*.

Peace, G. (1993). *Taguchi Methods: A Hand-On Approach to Quality Engineering* (4ª

edição). AddisonWesley Publishing Company.

Pereira, J., & Requeijo, Z. (2012). *Qualidade: Planeamento e Controlo Estatístico de Processos* (2ª). Lisboa.

Phadle, M. S. (1989). *Quality Engineering Using Robust Design*. Pratices Hall.

Pundir, R., Chary, G., & Dastidar, M. (2018). Application of Taguchi method for optimizing the process parameters for the removal of copper and nickel by growing Aspergillus sp. *Water Resources and Industry*, *20*, 83–92. https://doi.org/10.1016/j.wri.2016.05.001

Ross, P. (1996). *Taguchi Techniques for Quality Engineering* (2ª). McGraw-Hill.

Roy, R. (2010). *A primer on the Taguchi method*. *Computer Integrated Manufacturing Systems* (2nd ed., Vol. 5). https://doi.org/10.1016/0951-5240(92)90037-D

Taguchi, G. (1990). *Taguchi Engenharia da Qualidade em Sistemas de Produção*. (McGraw-Hill, Ed.). Lisboa.

Terán, G., Alba, N., Estrada, F., & Molina, J. (2015). Diseño robusto de parámetros para el proceso de sellado de bolsas Tyvek® 1073b – PET en máquina de sellado continuo. *CULCyT*, *0*(54).

ANEXOS

ANEXO A – ARRANJOS ORTOGONAIS E GRAFOS LINEARES
ANEXO B – TABELA F
ANEXO C – DIAGRAMA ISHIKAWA
ANEXO D – DADOS GAGE R&R

6 ANEXOS

ANEXO A – ARRANJOS ORTOGONAIS E GRAFOS LINEARES

Tabela 37 – Matriz L_4

Ensaio	A	B
1	1	1
2	1	2
3	2	1
4	2	2

Tabela 38 – Matriz L_8

Ensaio	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Tabela 39 – Matriz L_{12}

Ensaio	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1
7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1

Tabela 40 – Matriz L_{16}

Ensaio	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	O	P
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

Tabela 41 – Matriz L_9

Ensaio	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Tabela 42 – Matriz L_{27}

Ensaio	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3

5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

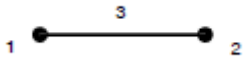


Figura 34 – Grafo Linear L4

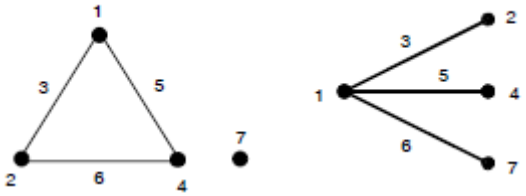


Figura 35 – Grafo Linear L_8

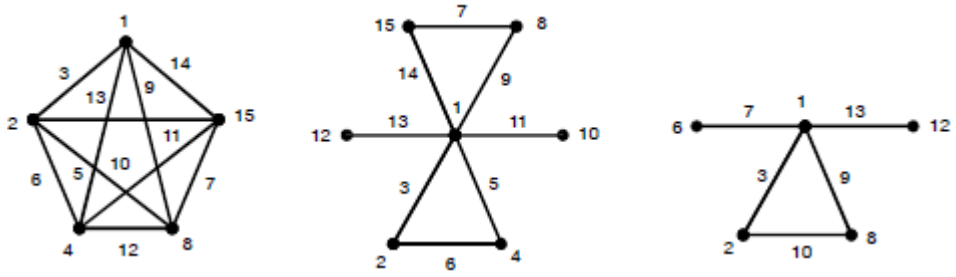


Figura 36 – Grafo Linear L_{12}

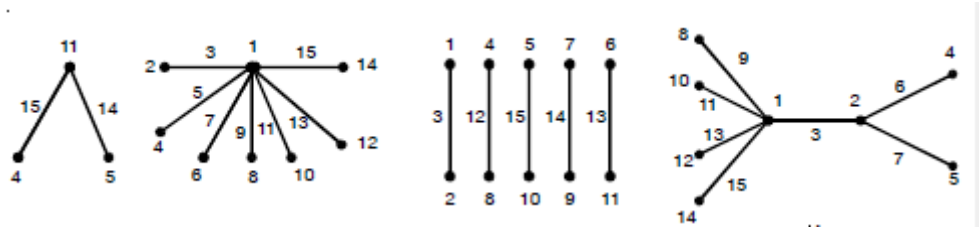


Figura 37 – Grafo linear L_{16}

ANEXO B – TABELA F

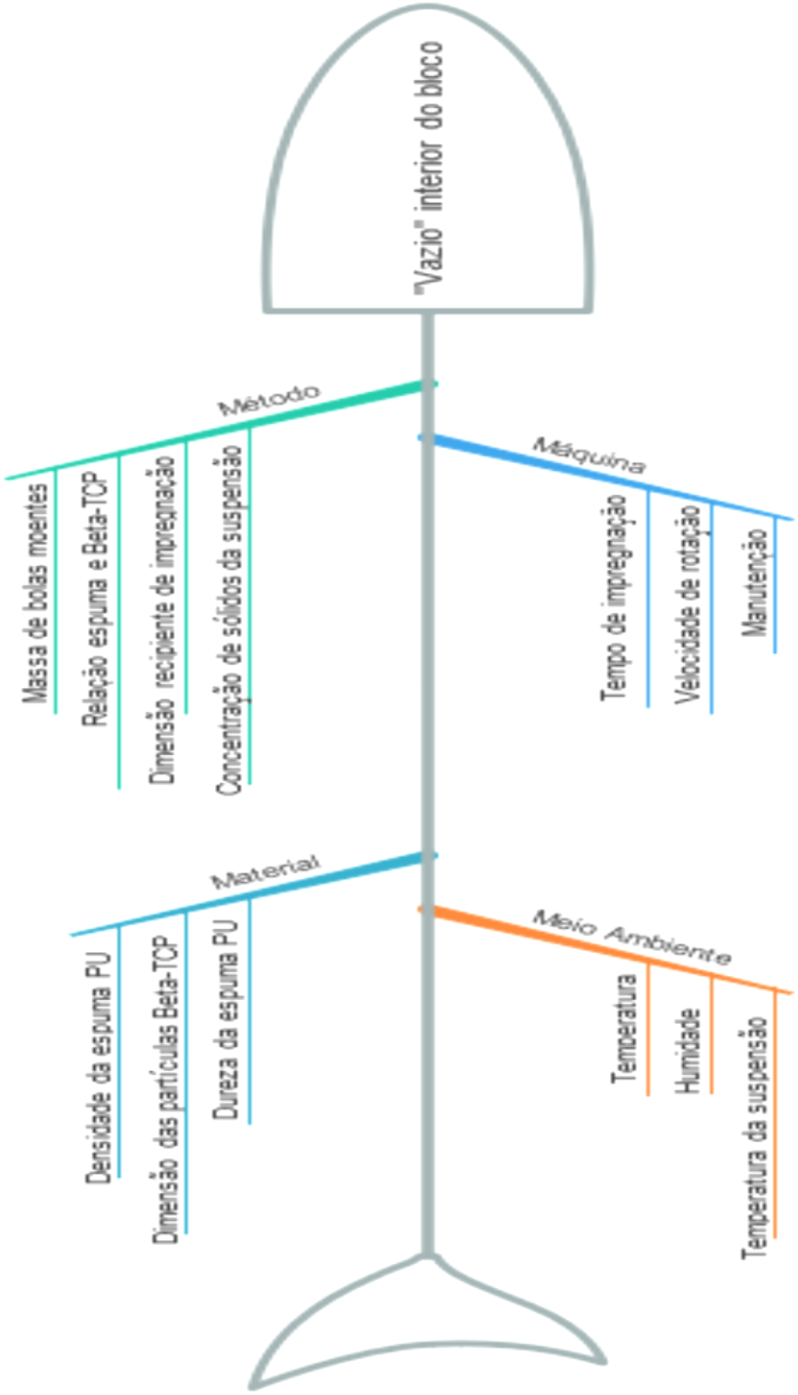
Tabela 43 – Tabela F nível de significância 10%

GL	V1																			
V2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	20	40	60	120	240
1	39.864	49.500	53.593	55.833	57.240	58.204	58.906	59.439	59.857	60.195	60.473	60.705	60.902	61.073	61.220	61.740	62.529	62.794	63.061	63.194
2	8.526	9.000	9.162	9.243	9.293	9.326	9.349	9.367	9.381	9.392	9.401	9.408	9.415	9.420	9.425	9.441	9.466	9.475	9.483	9.487
3	5.538	5.462	5.391	5.343	5.309	5.285	5.266	5.252	5.240	5.230	5.222	5.216	5.210	5.205	5.200	5.184	5.160	5.151	5.143	5.138
4	4.545	4.325	4.191	4.107	4.051	4.010	3.979	3.955	3.936	3.920	3.907	3.896	3.886	3.878	3.870	3.844	3.804	3.790	3.775	3.768
5	4.060	3.780	3.619	3.520	3.453	3.405	3.368	3.339	3.316	3.297	3.282	3.268	3.257	3.247	3.238	3.207	3.157	3.140	3.123	3.114
6	3.776	3.463	3.289	3.181	3.108	3.055	3.014	2.983	2.958	2.937	2.920	2.905	2.892	2.881	2.871	2.836	2.781	2.762	2.742	2.732
7	3.589	3.257	3.074	2.961	2.883	2.827	2.785	2.752	2.725	2.703	2.684	2.668	2.654	2.643	2.632	2.595	2.535	2.514	2.493	2.482
8	3.458	3.113	2.924	2.806	2.726	2.668	2.624	2.589	2.561	2.538	2.519	2.502	2.488	2.475	2.464	2.425	2.361	2.339	2.316	2.304
9	3.360	3.006	2.813	2.693	2.611	2.551	2.505	2.469	2.440	2.416	2.396	2.379	2.364	2.351	2.340	2.298	2.232	2.208	2.184	2.172
10	3.285	2.924	2.728	2.605	2.522	2.461	2.414	2.377	2.347	2.323	2.302	2.284	2.269	2.255	2.244	2.201	2.132	2.107	2.082	2.069
11	3.225	2.860	2.660	2.536	2.451	2.389	2.342	2.304	2.274	2.248	2.227	2.209	2.193	2.179	2.167	2.123	2.052	2.026	2.000	1.986
12	3.177	2.807	2.606	2.480	2.394	2.331	2.283	2.245	2.214	2.188	2.166	2.147	2.131	2.117	2.105	2.060	1.986	1.960	1.932	1.918
13	3.136	2.763	2.560	2.434	2.347	2.283	2.234	2.195	2.164	2.138	2.116	2.097	2.080	2.066	2.053	2.007	1.931	1.904	1.876	1.861
14	3.102	2.726	2.522	2.395	2.307	2.243	2.193	2.154	2.122	2.095	2.073	2.054	2.037	2.022	2.010	1.962	1.885	1.857	1.828	1.813
15	3.073	2.695	2.490	2.361	2.273	2.208	2.158	2.119	2.086	2.059	2.037	2.017	2.000	1.985	1.972	1.924	1.845	1.817	1.787	1.771
16	3.048	2.668	2.462	2.333	2.244	2.178	2.128	2.088	2.055	2.028	2.005	1.985	1.968	1.953	1.940	1.891	1.811	1.782	1.751	1.735
17	3.026	2.645	2.437	2.308	2.218	2.152	2.102	2.061	2.028	2.001	1.978	1.958	1.940	1.925	1.912	1.862	1.781	1.751	1.719	1.703
18	3.007	2.624	2.416	2.286	2.196	2.130	2.079	2.038	2.005	1.977	1.954	1.933	1.916	1.900	1.887	1.837	1.754	1.723	1.691	1.674
19	2.990	2.606	2.397	2.266	2.176	2.109	2.058	2.017	1.984	1.956	1.932	1.912	1.894	1.878	1.865	1.814	1.730	1.699	1.666	1.649
20	2.975	2.589	2.380	2.249	2.158	2.091	2.040	1.999	1.965	1.937	1.913	1.892	1.875	1.859	1.845	1.794	1.708	1.677	1.643	1.626
21	2.961	2.575	2.365	2.233	2.142	2.075	2.023	1.982	1.948	1.920	1.896	1.875	1.857	1.841	1.827	1.776	1.689	1.657	1.623	1.605
22	2.949	2.561	2.351	2.219	2.128	2.060	2.008	1.967	1.933	1.904	1.880	1.859	1.841	1.825	1.811	1.759	1.671	1.639	1.604	1.586
23	2.937	2.549	2.339	2.207	2.115	2.047	1.995	1.953	1.919	1.890	1.866	1.845	1.827	1.811	1.796	1.744	1.655	1.622	1.587	1.568
24	2.927	2.538	2.327	2.195	2.103	2.035	1.983	1.941	1.906	1.877	1.853	1.832	1.814	1.797	1.783	1.730	1.641	1.607	1.571	1.552
25	2.918	2.528	2.317	2.184	2.092	2.024	1.971	1.929	1.895	1.866	1.841	1.820	1.802	1.785	1.771	1.718	1.627	1.593	1.557	1.538
26	2.909	2.519	2.307	2.174	2.082	2.014	1.961	1.919	1.884	1.855	1.830	1.809	1.790	1.774	1.760	1.706	1.615	1.581	1.544	1.524
27	2.901	2.511	2.299	2.165	2.073	2.005	1.952	1.909	1.874	1.845	1.820	1.799	1.780	1.764	1.749	1.695	1.603	1.569	1.531	1.511
28	2.894	2.503	2.291	2.157	2.064	1.996	1.943	1.900	1.865	1.836	1.811	1.790	1.771	1.754	1.740	1.685	1.592	1.558	1.520	1.500
29	2.887	2.495	2.283	2.149	2.057	1.988	1.935	1.892	1.857	1.827	1.802	1.781	1.762	1.745	1.731	1.676	1.583	1.547	1.509	1.489
30	2.881	2.489	2.276	2.142	2.049	1.980	1.927	1.884	1.849	1.819	1.794	1.773	1.754	1.737	1.722	1.667	1.573	1.538	1.499	1.478
40	2.835	2.440	2.226	2.091	1.997	1.927	1.873	1.829	1.793	1.763	1.737	1.715	1.695	1.678	1.662	1.605	1.506	1.467	1.425	1.402
50	2.809	2.412	2.197	2.061	1.966	1.895	1.840	1.796	1.760	1.729	1.703	1.680	1.660	1.643	1.627	1.568	1.465	1.424	1.379	1.354
60	2.791	2.393	2.177	2.041	1.946	1.875	1.819	1.775	1.738	1.707	1.680	1.657	1.637	1.619	1.603	1.543	1.437	1.395	1.348	1.321
80	2.769	2.370	2.154	2.016	1.921	1.849	1.793	1.748	1.711	1.680	1.653	1.629	1.609	1.590	1.574	1.513	1.403	1.358	1.307	1.278
100	2.756	2.356	2.139	2.002	1.906	1.834	1.778	1.732	1.695	1.663	1.636	1.612	1.592	1.573	1.557	1.494	1.382	1.336	1.282	1.250
120	2.748	2.347	2.130	1.992	1.896	1.824	1.767	1.722	1.684	1.652	1.625	1.601	1.580	1.562	1.545	1.482	1.368	1.320	1.265	1.232
240	2.727	2.325	2.107	1.968	1.871	1.799	1.742	1.696	1.658	1.625	1.598	1.573	1.552	1.533	1.516	1.451	1.332	1.281	1.219	1.180

Tabela 44 – Tabela F nível de significância 5%

GL	V1																			
V2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	20	40	60	120	240
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.0	243.9	244.7	245.4	245.9	248.0	251.1	252.2	253.3	253.8
2	18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.329	19.353	19.371	19.385	19.396	19.405	19.412	19.419	19.424	19.429	19.446	19.471	19.479	19.487	19.492
3	10.128	9.552	9.277	9.117	9.013	8.941	8.887	8.845	8.812	8.785	8.763	8.745	8.729	8.715	8.703	8.660	8.594	8.572	8.549	8.538
4	7.709	6.944	6.591	6.388	6.256	6.163	6.094	6.041	5.999	5.964	5.936	5.912	5.891	5.873	5.858	5.803	5.717	5.688	5.658	5.643
5	6.608	5.786	5.409	5.192	5.050	4.950	4.876	4.818	4.772	4.735	4.704	4.678	4.655	4.636	4.619	4.558	4.464	4.431	4.398	4.382
6	5.987	5.143	4.757	4.534	4.387	4.284	4.207	4.147	4.099	4.060	4.027	4.000	3.976	3.956	3.938	3.874	3.774	3.740	3.705	3.687
7	5.591	4.737	4.347	4.120	3.972	3.866	3.787	3.726	3.677	3.637	3.603	3.575	3.550	3.529	3.511	3.445	3.340	3.304	3.267	3.249
8	5.318	4.459	4.066	3.838	3.688	3.581	3.500	3.438	3.388	3.347	3.313	3.284	3.259	3.237	3.218	3.150	3.043	3.005	2.967	2.947
9	5.117	4.256	3.863	3.633	3.482	3.374	3.293	3.230	3.179	3.137	3.102	3.073	3.048	3.025	3.006	2.936	2.826	2.787	2.748	2.727
10	4.965	4.103	3.708	3.478	3.326	3.217	3.135	3.072	3.020	2.978	2.943	2.913	2.887	2.865	2.845	2.774	2.661	2.621	2.580	2.559
11	4.844	3.982	3.587	3.357	3.204	3.095	3.012	2.948	2.896	2.854	2.818	2.788	2.761	2.739	2.719	2.646	2.531	2.490	2.448	2.426
12	4.747	3.885	3.490	3.259	3.106	2.996	2.913	2.849	2.796	2.753	2.717	2.687	2.660	2.637	2.617	2.544	2.426	2.384	2.341	2.319
13	4.667	3.806	3.411	3.179	3.025	2.915	2.832	2.767	2.714	2.671	2.635	2.604	2.577	2.554	2.533	2.459	2.339	2.297	2.252	2.230
14	4.600	3.739	3.344	3.112	2.958	2.848	2.764	2.699	2.646	2.602	2.565	2.534	2.507	2.484	2.463	2.388	2.266	2.223	2.178	2.155
15	4.543	3.682	3.287	3.056	2.901	2.790	2.707	2.641	2.588	2.544	2.507	2.475	2.448	2.424	2.403	2.328	2.204	2.160	2.114	2.090
16	4.494	3.634	3.239	3.007	2.852	2.741	2.657	2.591	2.538	2.494	2.456	2.425	2.397	2.373	2.352	2.276	2.151	2.106	2.059	2.035
17	4.451	3.592	3.197	2.965	2.810	2.699	2.614	2.548	2.494	2.450	2.413	2.381	2.353	2.329	2.308	2.230	2.104	2.058	2.011	1.986
18	4.414	3.555	3.160	2.928	2.773	2.661	2.577	2.510	2.456	2.412	2.374	2.342	2.314	2.290	2.269	2.191	2.063	2.017	1.968	1.943
19	4.381	3.522	3.127	2.895	2.740	2.628	2.544	2.477	2.423	2.378	2.340	2.308	2.280	2.256	2.234	2.155	2.026	1.980	1.930	1.905
20	4.351	3.493	3.098	2.866	2.711	2.599	2.514	2.447	2.393	2.348	2.310	2.278	2.250	2.225	2.203	2.124	1.994	1.946	1.896	1.870
21	4.325	3.467	3.072	2.840	2.685	2.573	2.488	2.420	2.366	2.321	2.283	2.250	2.222	2.197	2.176	2.096	1.965	1.916	1.866	1.839
22	4.301	3.443	3.049	2.817	2.661	2.549	2.464	2.397	2.342	2.297	2.259	2.226	2.198	2.173	2.151	2.071	1.938	1.889	1.838	1.811
23	4.279	3.422	3.028	2.796	2.640	2.528	2.442	2.375	2.320	2.275	2.236	2.204	2.175	2.150	2.128	2.048	1.914	1.865	1.813	1.785
24	4.260	3.403	3.009	2.776	2.621	2.508	2.423	2.355	2.300	2.255	2.216	2.183	2.155	2.130	2.108	2.027	1.892	1.842	1.790	1.762
25	4.242	3.385	2.991	2.759	2.603	2.490	2.405	2.337	2.282	2.236	2.198	2.165	2.136	2.111	2.089	2.007	1.872	1.822	1.768	1.740
26	4.225	3.369	2.975	2.743	2.587	2.474	2.388	2.321	2.265	2.220	2.181	2.148	2.119	2.094	2.072	1.990	1.853	1.803	1.749	1.720
27	4.210	3.354	2.960	2.728	2.572	2.459	2.373	2.305	2.250	2.204	2.166	2.132	2.103	2.078	2.056	1.974	1.836	1.785	1.731	1.702
28	4.196	3.340	2.947	2.714	2.558	2.445	2.359	2.291	2.236	2.190	2.151	2.118	2.089	2.064	2.041	1.959	1.820	1.769	1.714	1.685
29	4.183	3.328	2.934	2.701	2.545	2.432	2.346	2.278	2.223	2.177	2.138	2.104	2.075	2.050	2.027	1.945	1.806	1.754	1.698	1.669
30	4.171	3.316	2.922	2.690	2.534	2.421	2.334	2.266	2.211	2.165	2.126	2.092	2.063	2.037	2.015	1.932	1.792	1.740	1.683	1.654
40	4.085	3.232	2.839	2.606	2.449	2.336	2.249	2.180	2.124	2.077	2.038	2.003	1.974	1.948	1.924	1.839	1.693	1.637	1.577	1.544
50	4.034	3.183	2.790	2.557	2.400	2.286	2.199	2.130	2.073	2.026	1.986	1.952	1.921	1.895	1.871	1.784	1.634	1.576	1.511	1.476
60	4.001	3.150	2.758	2.525	2.368	2.254	2.167	2.097	2.040	1.993	1.952	1.917	1.887	1.860	1.836	1.748	1.594	1.534	1.467	1.430
80	3.960	3.111	2.719	2.486	2.329	2.214	2.126	2.056	1.999	1.951	1.910	1.875	1.845	1.817	1.793	1.703	1.545	1.482	1.411	1.370
100	3.936	3.087	2.696	2.463	2.305	2.191	2.103	2.032	1.975	1.927	1.886	1.850	1.819	1.792	1.768	1.676	1.515	1.450	1.376	1.333
120	3.920	3.072	2.680	2.447	2.290	2.175	2.087	2.016	1.959	1.910	1.869	1.834	1.803	1.775	1.750	1.659	1.495	1.429	1.352	1.307
240	3.881	3.033	2.642	2.409	2.252	2.136	2.048	1.977	1.919	1.870	1.829	1.793	1.761	1.733	1.708	1.614	1.445	1.375	1.290	1.237

ANEXO C – DIAGRAMA ISHIKAWA



ANEXO D – DADOS GAGE R&R

Tabela 45 – Dados medição R&R

Operador	Peça	Medição (g)	Medição (mm)
A	1	13,05	39,03
A	2	12,96	40,05
A	3	13,00	40,10
A	4	12,56	38,98
A	5	12,45	39,73
A	6	13,08	41,06
A	7	12,87	43,00
A	8	12,95	39,85
A	9	13,08	39,56
A	10	13,10	40,13
A	1	13,05	39,05
A	2	12,97	40,07
A	3	13,00	40,08
A	4	12,56	38,98
A	5	12,46	39,75
A	6	13,08	41,06
A	7	12,87	43,00
A	8	12,96	39,84
A	9	13,08	39,57
A	10	13,10	40,13
A	1	13,05	39,02
A	2	12,96	40,05
A	3	13,00	40,10
A	4	12,55	38,99
A	5	12,45	39,72
A	6	13,08	41,06
A	7	12,87	43,00
A	8	12,96	39,86
A	9	13,08	39,55
A	10	13,10	40,12
R	1	13,06	39,03
R	2	12,96	40,06
R	3	13,01	40,10
R	4	12,56	38,98

R	5	12,46	39,72
R	6	13,08	41,06
R	7	12,87	43,00
R	8	12,96	39,84
R	9	13,08	39,56
R	10	13,10	40,13
R	1	13,06	39,02
R	2	12,96	40,05
R	3	13,00	40,10
R	4	12,56	38,97
R	5	12,45	39,73
R	6	13,08	41,50
R	7	12,88	43,00
R	8	12,96	39,85
R	9	13,08	39,57
R	10	13,10	40,13
R	1	13,05	39,04
R	2	12,96	40,04
R	3	13,00	40,10
R	4	12,55	38,98
R	5	12,45	39,74
R	6	13,08	41,06
R	7	12,87	43,00
R	8	12,96	39,85
R	9	13,08	39,56
R	10	13,10	40,13
N	1	13,05	39,03
N	2	12,97	40,06
N	3	13,00	40,10
N	4	12,55	38,99
N	5	12,45	39,73
N	6	13,08	41,05
N	7	12,87	43,00
N	8	12,96	39,86
N	9	13,08	39,55
N	10	13,10	40,13
N	1	13,05	39,05
N	2	12,97	40,05

N	3	13,00	40,10
N	4	12,56	38,98
N	5	12,45	39,74
N	6	13,08	41,07
N	7	12,87	43,00
N	8	12,96	39,86
N	9	13,08	39,55
N	10	13,10	40,13
N	1	13,05	39,04
N	2	12,96	40,05
N	3	13,01	40,10
N	4	12,56	38,99
N	5	12,46	39,72
N	6	13,08	41,06
N	7	12,87	43,00
N	8	12,96	39,85
N	9	13,08	39,56
N	10	13,10	40,12