

Uma nova abordagem à seleção de variáveis para o planeamento de experiências

Muhammad Arsalan Farooq

E-mail: farooq.arsalan@fe.up.pt

Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto,
Portugal

Henriqueta Nóvoa

E-mail: hnovoa@fe.up.pt

Departamento de Engenharia Industrial e Gestão, Faculdade de Engenharia, Universidade
do Porto, Portugal

S.M.O. Tavares

E-mail: sergio.tavares@fe.up.pt

Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial - INEGI, Porto, Portugal

António Araújo

E-mail: acaraujo@fe.up.pt

Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto,
Portugal

Resumo:

Este artigo aborda a fase dos testes prévios à condução do Planeamento de Experiências (DOE), usando pela primeira vez uma ferramenta da área dos sistemas de engenharia para uma melhor definição do problema de qualidade a analisar, permitindo também uma melhor seleção dos fatores controláveis e respetivos níveis e gamas operatórias. Esta nova ferramenta, baseada numa amplamente conhecida ferramenta de sistemas de engenharia chamada Matriz de Estrutura de Projeto (DSM), foi denominada como Matriz de Não-Conformidades (NCM), sendo uma matriz que sistematiza as não-conformidades originadas ao longo da linha de produção, destacando as inter-relações entre elas de uma forma estruturada. O artigo também aborda as principais diretrizes a ter em conta quando se realizam os testes prévios ao desenho de experiências escolhido, tendo como base um caso de estudo real de um processo de fabricação de bens de consumo, i.e. aerossóis em folha-de-flandres. Esta nova proposta permite uma modelação holística de todo o sistema de produção, tendo-se revelado uma ferramenta valiosa para uma aplicação mais eficaz do DoE.

Palavras-chave: Matriz de Não-Conformidades, Planeamento de Experiências, Testes pré-experimentais.

Abstract:

This paper addresses the study of the pre-experimental planning phase of the Design of Experiments (DoE), using a new tool for a clearer definition of the problem under analysis, as well as for the selection of control factors and their respective levels and ranges. This new tool, based on a widely engineering systems tool named DSM-Design Structure Matrix, was called the Non-Conformity Matrix (NCM), a matrix that systematizes the non-conformities originated along the production line, highlighting the inter-relationships between them in a structured way. The paper also addresses the key steps to take into account when performing pre-experimental runs, considering the example of a consumer goods manufacturing process. The proposed new approach allows modelling the entire manufacturing system holistically, and has proved to be a valuable insight for a more effective application of DoE.

Keywords: Pre-experimental runs, Non-Conformity Matrix, Design of Experiments.

1. Introdução

O Planejamento de Experiências (DoE-Design Of Experiments) é uma ferramenta fundamental para a melhoria da performance dos processos e a sua otimização. O objetivo primordial desta ferramenta é o de assegurar processos robustos, logo menos afetados por fontes externas de variabilidade. Pode igualmente dizer-se que estudar o desempenho dos processos e sistemas de forma a melhor compreender o comportamento de cada um dos fatores controláveis do processo e o seu impacto nas características de qualidade finais do produto, são igualmente objetivos desta ferramenta. Em síntese, pode-se dizer que as experiências são conduzidas de forma a (Montgomery et al., 2000):

- Determinar quais os fatores controláveis que mais influenciam a variável de resposta;
- Determinar a que níveis é que se devem estabelecer os fatores controláveis significativos, a fim de assegurar que a resposta(s) estão perto de seu valor alvo;
- Determinar a que níveis é que se devem estabelecer os fatores controláveis significativos, a fim de assegurar que os efeitos dos fatores incontroláveis e do ruído na variável de resposta seja mínimo.

Uma aplicação sistemática de DoE em projetos de melhorias de qualidade traduz-se em processos mais produtivos e com menor variabilidade, bem como na redução dos custos globais (Montgomery, 2008), sendo esta a razão principal da utilização crescente destas técnicas (Montgomery et al., 2000; Javorsky et al., 2014). Outras aplicações comuns de DoE estão relacionadas com o desenvolvimento e a conceção de novos produto (Fowlkes and Creveling, 1996) bem como na sua otimização (Subulan and Cakmakci, 2011).

Uma análise de DoE integra sempre três importantes etapas: uma etapa prévia de planeamento das experiências, execução das experiências e, finalmente, a análise estatística dos dados recolhidos (Costa et al., 2006). Acautelar a fase prévia de planeamento das experiências é fundamental para o sucesso na realização das experiências, bem como para a validade das conclusões finais. No final desta fase, é expectável que estejam completamente definidos claramente os objetivos das experiências e a seleção das variáveis de resposta, juntamente com os níveis de cada fator e as gamas a utilizar.

De forma a melhor definir e caracterizar o problema, há várias técnicas simples que ajudam na identificação dos potenciais fatores de variação a considerar como, por exemplo, os diagramas de causa-e-efeito ou a Análise de Modos de Falha. Como alternativa e também como complemento à utilização destas técnicas na identificação dos potenciais fatores de variação e da sua gama de experimentação, apresenta-se neste artigo uma nova ferramenta da área dos sistemas de engenharia, denominada Matriz de Não-Conformidades (Non-Conformity Matrix-NCM). Esta ferramenta permite uma modelação holística de todo o sistema (i.e, do processo industrial), permitindo igualmente uma análise sistemática das interações entre os diferentes elementos da matriz, que, no caso presente, consistem nas não-conformidades encontradas ao longo do processo produtivo.

Uma vez identificada a etapa do processo a estudar, é importante selecionar corretamente os fatores controláveis e respetivas gamas de variação, que vão ser otimizadas através das experiências a executar posteriormente. Esta identificação só é conseguida se o responsável pela condução das experiências possuir um conhecimento do processo profundo, integrando um conhecimento prático do processo com um conhecimento teórico da técnica, conhecimentos que devem sempre estar alicerçados por dados históricos. No entanto, mesmo considerando toda esta informação, a identificação correta dos fatores a considerar e respetivas gamas de experimentação pode ser difícil de conseguir. As razões deste facto prendem-se com um sem número de causas possíveis, tais como, por exemplo, uma certa instabilidade do processo, traduzida num comportamento algo errático dos níveis dos fatores controláveis usados de cada vez que a produção é iniciada, bem como pela presença de fatores de ruído imprevisíveis. Fazer testes pré-experimentais à condução do planeamento de experiências, de forma a melhor identificar os níveis dos fatores a considerar e respetivas gamas, é um bom princípio para resolver este problema. De facto, já vários autores (Czitrom, 2003; Coleman and Montgomery, 1993) mencionaram esta prática como um bom princípio na condução de um correto planeamento de experiências. A aplicação do desenho de experiências a outros problemas similares em indústrias dos semicondutores, farmacêutica e automóvel tem mostrado resultados

de sucesso e convincentes, suportando a estabilidade dos processos de fabrico através da minimização da variabilidade e dos valores médios, (Konda & Guha, 1998; Montgomery et al., 2000; Javorsky et al., 2014; Antony, 1999).

A fase do planeamento de experiências, aqui identificada como testes prévios, pode ser desdobrada nas seguintes fases: (1) uma clara identificação do problema, melhor conseguida através da utilização da ferramenta anteriormente denominada NCM, conjuntamente com (2) uma correta seleção dos fatores e respetivas gamas a considerar. Os problemas típicos e os cuidados a ter na aplicação a um caso industrial aquando da seleção dos fatores e respetivos níveis, bem como na implementação dos testes prévios às experiências a realizar são de igual modo realçados.

Nas seções seguintes apresenta-se uma breve introdução ao Planeamento de Experiências (DoE), com especial enfoque na fase dos testes prévios à execução das experiências. Também nesta seção são revistos os princípios base da Matriz de Não-Conformidades (NCM). De seguida, e sempre tendo por base um exemplo industrial, são analisados com maior detalhe os cuidados a ter e as diretrizes a seguir na condução dos testes prévios, identificando os aspetos críticos ao seu sucesso.

2. Diretrizes para o Planeamento de Experiências (DoE)

É globalmente aceite que um planeamento de experiências para ter sucesso compreende um conjunto de etapas básicas (Tabela I). As primeiras quatro fases estão associadas a uma fase global normalmente referenciada como fase de planeamento, que poderá incluir os testes pré-experimentais (Montgomery, 2008).

Tabela I – Diretrizes para o Planeamento de Experiências

1. Definir e descrever claramente o problema	}	Fase de planeamento pré-experimental
2. Selecionar os fatores, níveis a considerar e gamas		
3. Selecionar as variáveis de resposta		
4. Escolher o desenho apropriado da experiência		
5. Executar a experiência	}	Fase de execução
6. Analisar os dados recolhidos	}	Fase de análise estatística e tomada de decisão
7. Validar os resultados com testes confirmatórios		
8. Retirar conclusões da análise e efetuar recomendações		

Em DoE, a forma como é conduzida a fase de planeamento é claramente decisiva para a validade dos resultados finais. Sendo vasto o tema e a literatura existente sobre o assunto (Costa et al., 2006; Freeman et al., 2013; Simpson et al., 2013; Tanco et al., 2009), julgou-se pertinente restringir a discussão ao ponto 1 e 2 destas diretrizes, ilustrando a forma como estes pontos foram abordados recorrendo a um exemplo industrial.

3. Abordagens para a fase de planeamento pré-experimental

Uma vez identificada a área de intervenção para o DoE, há várias possibilidades/técnicas para identificar os fatores que potencialmente influenciam o problema em análise. Entre outras, é comum usar os diagramas causa-e-efeito (Ishikawa diagrams), a técnica Desdobramento da Função da Qualidade (Quality Functional Deployment - QFD), ou mesmo a Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA) nesta fase pré-experimental (Fahmy et al., 2012; Montgomery, 2008; Taguchi et al., 2005).

Primeiramente são identificados e listados todos os fatores controláveis e incontroláveis que potencialmente influenciam a qualidade do produto final. De forma a ser mais produtivo, é usual que este processo decorra em sessões de *brainstorming*, integrando equipas multidisciplinares com engenheiros de processo, engenheiros de qualidade e operadores de linha. O diagrama de causa-e-efeito é uma excelente ferramenta para organizar hierarquicamente estas potenciais causas, sendo também através de consenso entre os participantes que se chega à conclusão de quais os fatores a selecionar. A FMEA pode substituir o diagrama de causa-e-efeito com vantagens, já que, sendo uma metodologia para análise dos modos de falha e a compreensão da sua frequência e impacto, providencia adicionalmente a informação sobre a gravidade do efeito e do seu modo de falha potencial. Estas métricas são representadas através do Número de Prioridade de Risco (RPN) para cada efeito, calculado de forma subjetiva e integrando a informação da severidade, detetabilidade e ocorrência dos modos de falha, calculado de forma subjetiva (Fahmy et al., 2012).

Outra técnica que pode ser usada para desenvolver uma matriz do processo, realçando as interações entre os elementos do sistema é o QFD (Browning, 2001). Esta técnica é um processo que compreende quatro etapas: compreender os requisitos do cliente e desenvolver a matriz de planificação do produto, desenvolver a matriz de planificação do processo, e, na última etapa, desenvolver a matriz de planificação da produção (Taguchi et al., 2005; Hassan et al., 2010).

A técnica proposta neste artigo para identificar a região alvo de melhoria e o foco do DoE é a ferramenta da área dos sistemas de engenharia anteriormente referida como Matriz de Não-

Conformidades (NCM). Esta ferramenta modela o sistema de forma holística, apresentando as relações de causa-e-efeito entre os vários elementos da matriz, que, neste caso, consistem nas não-conformidades encontradas nas várias etapas do processo de fabrico, em forma de matriz. A ferramenta proposta, quando comparada com as ferramentas mais usuais no contexto da utilização em melhoria contínua, tem três vantagens adicionais: (i) identificação da região de interesse através de uma análise global ao processo produtivo (o QFD é correntemente usado para um propósito similar, mas num contexto diferente); (ii) as relações de causa-e-efeito entre não-conformidades são identificadas de uma forma sistemática e inovadora (iii) a possibilidade de aplicar algoritmos e operações matemáticas como forma de otimizar a matriz, realçando as interações mais pertinentes e críticas.

3.1.A Matriz de Não-Conformidades (NCM)

A Matriz de Não-Conformidades (NCM) é uma ferramenta baseada na Matriz de Estrutura de Projeto (Design Structure Matrix - DSM) (Browning, 2001; Eppinger and Browning, 2012) pensada como forma de sistematizar as não-conformidades geradas num determinado processo produtivo em forma de matriz, realçando as relações e potenciais interações entre elas. A utilização desta abordagem a diferentes domínios de aplicação são várias (Eppinger and Browning, 2012), mas é a primeira vez que esta metodologia de análise é aplicada a um problema específico de melhoria da qualidade. Assim, como forma de integrar esta ferramenta e sistematizar a aplicação da NCM a um problema de produção de melhoria da qualidade, foi desenvolvida uma metodologia baseada em 10 passos (Tavares et al., 2013) metodologia que não será abordada no contexto deste artigo.

Como resultado da aplicação dos princípios da DSM a um novo contexto, consubstanciado na NCM, identificaram-se mais facilmente agrupamentos de não-conformidades associados a certas etapas do processo de fabrico, que permitiram, numa segunda fase, uma melhor definição de quais as prioridades em termos de projetos de melhoria da qualidade. Em (Farooq et al., 2014) é discutido detalhadamente a forma como se constrói uma NCM e quais as fases mais relevantes do processo, de forma a melhor capturar o conhecimento dos especialistas da indústria. Em síntese, o objetivo último da utilização desta ferramenta é o de realçar pontos críticos no processo produtivo, etapa prévia à seleção de projetos focados de melhoria da qualidade.

4. Exemplo de aplicação industrial

Os aerossóis em folha-de-flandres são bens de consumo produzidos em massa pela indústria das embalagens metálicas e usados amplamente pelas indústrias de produtos de higiene pessoal, cosmética e higiene do lar. Apesar de ser um produto aparentemente simples, os requisitos por parte dos clientes são dos mais variados e extremamente exigentes, incluindo ausência de imperfeições na aparência, garantia de completa estanquicidade e ser totalmente seguro quando está sob pressão. Embora por um lado estas indústrias sigam normas internacionais que regulamentam os diferentes aspetos relacionados com a integridade estrutural do aerossol, por outro lado, os clientes exigem cada vez mais níveis superiores de segurança e níveis de qualidade mais elevados, sendo cada vez menos tolerantes a lotes de unidades com defeitos por mais impercetíveis que sejam.

No caso dos aerossóis em folha-de-flandres, a aplicação do desenho de experiências foi efetuada com foco numa das etapas do processo de fabrico de forma a melhorar a fiabilidade do mesmo e, assim, reduzir o número de não-conformidades e melhorar os índices de qualidade final dos aerossóis. O primeiro passo para o projeto de um desenho de experiências passa pela definição clara do problema que se quer abordar. Neste caso, foi utilizada a Matriz de Não-Conformidades, NCM, de forma a obter uma visão geral do sistema produtivo, as respetivas ligações das diferentes etapas e interações de não-conformidades que se podem propagar ao longo da linha produtiva. A partir desta análise foram identificados os principais parâmetros no qual o desenho de experiências deveria incidir na sua fase pré-experimental.

A descrição do produto e do processo fabrico serão introduzidas nas secções seguintes, sendo incluída a descrição da aplicação da Matriz de Não-Conformidades neste problema.

4.1. Descrição do produto

Os aerossóis tem como principal objetivo o armazenamento de produtos que são dispensados com a ajuda de um propulsor em pressão. Estes produtos podem ser dispersos na forma de partículas de líquidos ou em espuma, dependendo do tipo de propulsor e das propriedades dos produtos armazenados. Os aerossóis são usualmente produzidos em aço ou em alumínio, sendo que este estudo se debruça sobre os primeiros. Estes aerossóis são produtos simples, compostos por três partes principais: o topo, a base e o corpo, como esquematizado na Figura 1.

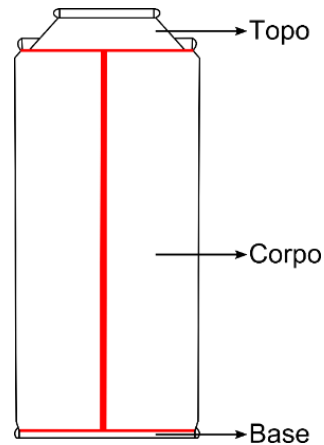


Figura 1 – Aerossol composto por três partes.

A empresa deste estudo é líder na produção destes aerossóis, fornecendo-os com e sem enchimento de acordo com as especificações dos clientes. O caso aqui apresentado está focado nos aerossóis sem enchimento, não contemplando a válvula, o atuador e a tampa, que são componentes adicionados durante o enchimento.

4.2. Descrição do Processo de Fabrico

O processo de fabrico de um aerossol em folha-de-flandres é composto por múltiplos passos interligados e com uma elevada cadência de fabrico, sendo um processo com alguma complexidade. Este processo contempla as seguintes fases: corte primário, litografia e envernizamento, corte secundário e estampagem/montagem.

No corte primário, a folha-de-flandres que formará o corpo, é desenrolada de uma bobina, desfibrada e cortada em frações. A chapa para a produção dos topos e das bases também é cortada nesta fase. No processo de envernizamento e litografia, as frações das folhas-de-flandres são impressas de acordo com as especificações do cliente, sendo esta impressão protegida com verniz. Após este passo, é realizado um corte secundário com as dimensões de cada corpo do aerossol. Na estampagem/montagem, os topos e as bases são estampadas e o corpo é soldado, formando assim um cilindro. No final, estes três componentes são cravados formando assim o aerossol.

4.3. Matriz de não-conformidades

A aplicação da matriz de não-conformidades ao processo de fabrico do aerossol iniciou-se com a modelação completa do sistema produtivo, evidenciando todos os pontos de controlo de qualidade e as não conformidades que possam ser detetadas nesses pontos de controlo. Na Figura 2 está representado um exemplo de matriz de não-conformidades com 44x44 elementos,

obtida após entrevistas com os especialistas da linha (Farooq et al., 2013; Farooq et al., 2014). Cada elemento da matriz representa uma não-conformidade ou um defeito, estando estas representadas de forma sequencial. As não-conformidades apresentadas na vertical são as mesmas que na horizontal, por isso, quando existem relações fora da diagonal significa que existe dependência entre elas. Lendo a matriz a partir das colunas, e seguindo uma coluna específica associada a uma particular não-conformidade, um pequeno quadrado (ou um 1) na interseção entre linha e coluna significa que esta não-conformidade pode estar na origem da não-conformidade da respetiva linha, havendo uma interdependência entre NC. No caso de não haver dependência entre NC, as posições são deixadas em branco (ou um zero).

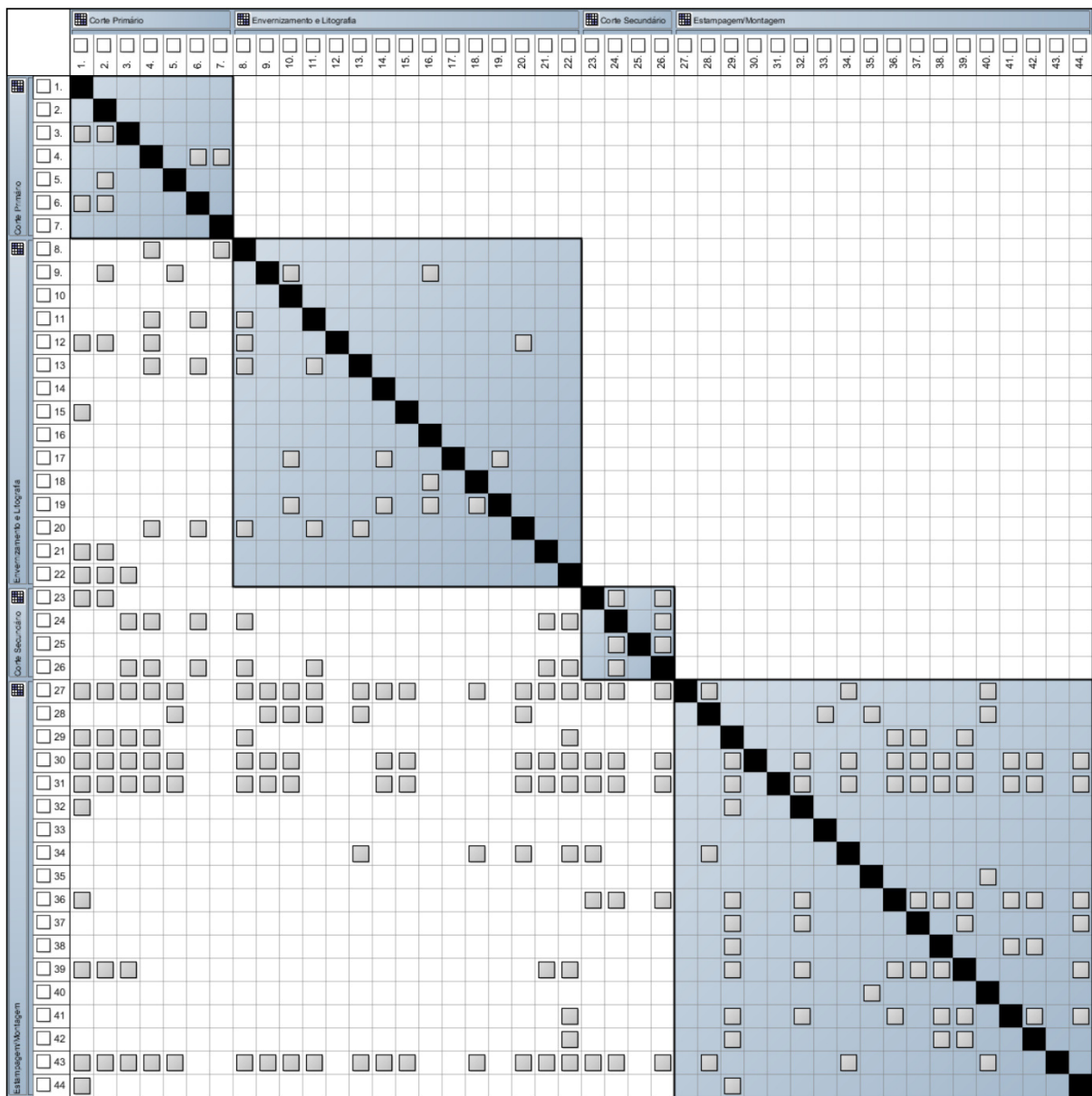


Figura 2 – Matriz de não-conformidades inicial, sem manipulação matricial.

A Figura 3 mostra a matriz de não-conformidades após a aplicação de algoritmos de sequenciação, que foram aplicados dentro de cada etapa do processo produtivo para que as não-conformidades se mantenham agrupadas nas respectivas etapas. Este algoritmo organiza as não-conformidades de forma a que fiquem na parte inferior da diagonal, ficando assim organizadas de forma sequencial. As não-conformidades que se mantêm acima da diagonal são não-conformidades com inter-relações. Manipulando esta matriz também é possível chegar a 4 clusters de não-conformidades: (i) corte primário; (ii) litografia e envernizamento que são influenciadas essencialmente por não-conformidades do corte primário; (iii) corte secundário que são influenciadas maioritariamente por não conformidades da litografia e envernizamento e do próprio corte secundário e (iv) estampagem/montagem que são significativamente afetadas pelas não conformidades originadas no próprio cluster. As linhas com o maior número de relações estão associadas a parâmetros de qualidade que são analisados nos pontos de controlo, como seria esperado. A análise da importância das não-conformidades foi realizada através do diagrama de Pareto para quantificação do número de ocorrências das mesmas e o seu impacto na qualidade do produto final. Esta análise mostrou que o processo de soldadura é o que promove mais problemas de qualidade, sendo então este escolhido como o foco desta investigação.

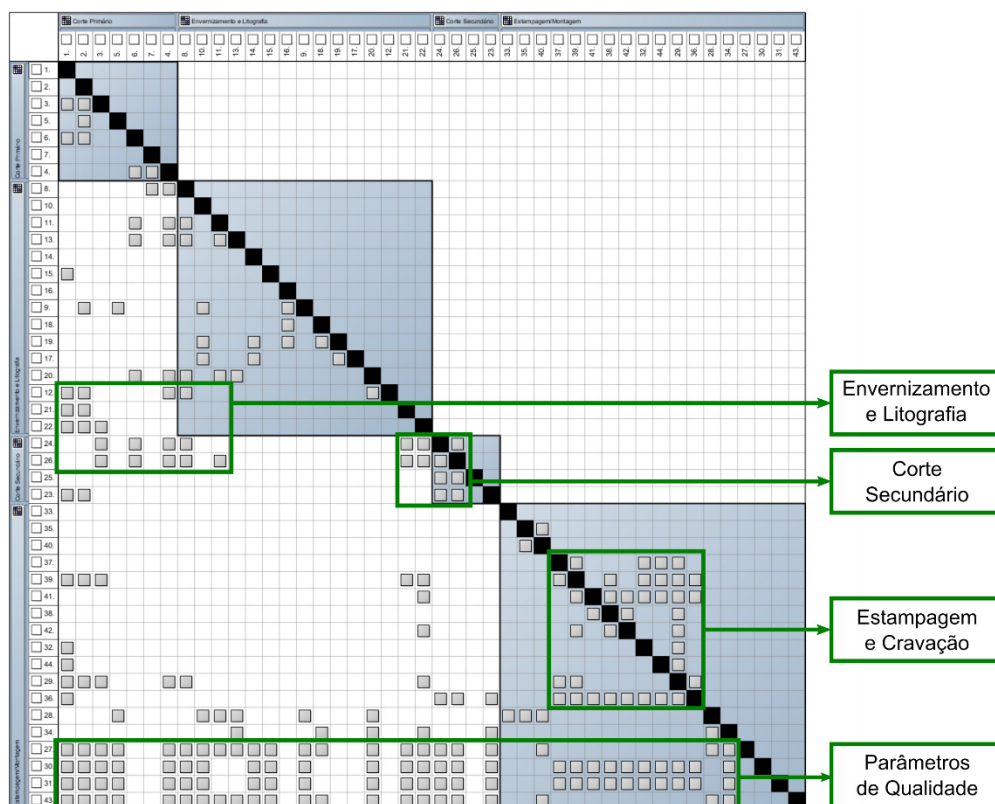


Figura 3 – Matriz de não conformidades após manipulação matricial e criação de clusters.

Após definição do processo alvo a otimizar com o DoE é necessário selecionar os fatores que vão ser objeto de análise e os respetivos níveis e gamas. Ao longo deste processo e após uma análise aprofundada na linha de produção, percebeu-se que alguns fatores têm uma grande sensibilidade a variações, levando a que pequenas variações tenham efeitos muito diferenciados. Também foi identificado um conjunto significativo de variáveis de ruído que limitariam a replicação das experiências com as mesmas condições ao longo de toda a investigação. Dessa forma, e com base nos valores inicialmente propostos pelos especialistas do processo, foi executado um conjunto de testes pré-experimentais de forma a permitir uma identificação mais clara dos níveis e gamas de experiência a serem usados durante a execução das experiências. Este processo será detalhado nos pontos seguintes.

5. Seleção de fatores e respetivas gamas

A seleção de fatores e respetivos níveis e gamas deve ser realizada de forma iterativa, uma vez que as primeiras iterações podem conter demasiados fatores tornando a execução das experiências impraticável em tempo útil. Desse modo, o desenho de experiência deve ser adaptado aos recursos disponíveis e aos objetivos definidos.

As ferramentas para uma análise macro de seleção dos níveis e gamas dos fatores podem ser, de forma geral baseadas: em experimentação, na teoria, na opinião de especialistas ou no conhecimento acumulado sobre o processo, nos recursos disponíveis, nos resultados experimentais prévios e através da realização de ensaios pré-experimentais, (Montgomery, 2008; Czitrom, 2003).

A seleção de níveis e gamas dos fatores deve também ter em conta se estes são quantitativos ou qualitativos - para o caso em análise apenas foram considerados fatores quantitativos, listados na Tabela I. Como o objetivo central desta investigação preliminar é perceber a função de resposta de parâmetros de processo nas variáveis de saída, de forma a melhor compreender o impacto e a direção do respetivo efeito, assim como se são relações lineares ou não-lineares, foram selecionados três níveis para cada fator. Como o processo em causa nunca foi analisado do ponto de vista de DoE, iniciou-se este processo com testes pré-experimentais para ganhar uma maior sensibilidade ao processo de fabrico. A partir da análise do processo de fabrico com a Matriz de Não-Conformidades e com o diagrama de Pareto, foram identificadas quais as fases do processo de fabrico que tem maior impacto na qualidade final do produto e dessa forma circunscrever a aplicação do desenho de experiências. Durante este processo, as diferentes conclusões foram debatidas com os técnicos especialistas, permitindo definir os fatores

controláveis, incontroláveis e de ruído que podem de algum modo afetar o resultado do processo. Numa segunda fase, após a definição final de todos os fatores, foram discutidos quais deles seriam mais relevantes de forma a reduzir e a simplificar a primeira aplicação do desenho de experiências. A Tabela II mostra a lista final dos fatores que foram estudados no desenho de experiências, correspondendo ao segundo passo da Tabela I.

Tabela II – Fatores de controlo

Fatores de Controlo
Corrente
Força
Velocidade da linha
Distância entre corpos

Após a seleção dos fatores é necessário determinar quais as gamas a experimentar de cada fator (i.e., o intervalo dentro do qual deve variar cada fator), e respetivos níveis que devem ser utilizados durante o desenho de experiências, de forma a existir uma melhor perceção do impacto da magnitude e variações no resultado final da qualidade da ligação. Se estes níveis e gamas não forem corretamente definidos, podemos estar a analisar os parâmetros fora da gama ótima e assim as recomendações finais poderão originar uma detioração dos níveis atuais de qualidade.

Devido à grande variabilidade de fatores externos ao processo, como, por exemplo, as diferentes propriedades da folha-de-flandres de acordo com diversos fornecedores, não foi possível identificar corretamente os níveis dos fatores a utilizar nas experiências sem a execução de testes pré-experimentais. As diretrizes seguidas nestes testes serão descritas na seção seguinte.

5.1. Testes pré-experimentais

Os testes pré-experimentais são usualmente aplicados nas seguintes situações:

- a) Quando não é conhecida a função de resposta de um fator quantitativo, isto é, se ele tem um comportamento linear (2 níveis) ou não-linear (3 ou mais níveis). Geralmente, são usados 2 níveis quando o objetivo da experiência é determinar se o fator tem ou não impacto na resposta em termos de variação e respetiva direção (crescente ou decrescente). Três ou mais níveis são usados quando o objetivo da experiência é estudar a função resposta do fator;

b) Quando não é possível especificar os níveis e gamas dos fatores quantitativos e quando é necessário explorar o comportamento de fatores do processo numa gama alargada de valores. Embora haja autores que aconselham que a variável ou variáveis de resposta seja escolhida em primeiro lugar, só sendo selecionadas os fatores controláveis numa segunda fase (Freeman et al., 2013), há muitas situações em que esta seleção é feita em conjunto. Foi este o procedimento seguido neste caso, juntamente com a identificação de todos os fatores de ruído. Estes fatores de ruído devem ser controlados tanto quanto possível de forma a assegurar que têm valores constantes não só ao longo dos testes pré-experimentais, como também na execução das experiências. Devido a cláusulas de confidencialidade, as variáveis de resposta escolhidas e a respetiva quantificação, bem como os fatores de ruído identificados são omitidos neste artigo. Numa primeira iteração, foi realizada uma sessão de *brainstorming* com os especialistas do processo de forma a ter uma primeira estimativa de valores para os fatores dos testes pré-experimentais. Esta iteração permitiu reduzir o tempo total dos testes pré-experimentais porque forneceu estimativas dos níveis apropriados para iniciar os testes. Os fatores selecionados e respetiva estimativa dos níveis estão descritos na Tabela III:

Table III: Fatores de controlo e respetivos níveis.

Fatores de controlo	*Valores estimados (mínimo-máximo)
Corrente	598-611
Força	117-130
Velocidade linear	151-169
Espaço entre corpos	3.9-5.2

* Devido a cláusulas de confidencialidade, os valores reais não são apresentados

A Tabela IV lista diretrizes para a implementação de testes pré-experimentais.

Tabela IV – Diretrizes para a implementes de testes pré-experimentais.

1. Calibração da(s) variável(s) de resposta selecionada(s) e respetiva quantificação.
2. Registrar todos os possíveis fatores de ruído e quantificá-los;
3. Ajustar os equipamentos para valores nominais de serviço e iniciar a produção;
4. Registrar os valores nominais para todos os fatores de controlo quando a produção estiver estabilizada e a produzir unidades conformes;
5. Aumentar incrementalmente* o primeiro fator de controlo do valor nominal para um valor máximo em que o processo continue a produzir unidades conformes de acordo com as variáveis de resposta;
6. Registrar o valor máximo do fator;
7. Reduzir incrementalmente* o primeiro fator de controlo do valor nominal para um valor menor em que o processo continue a produzir unidades conformes de acordo com as variáveis de resposta;
8. Registrar o valor mínimo do fator;
9. A gama desse fator será então definida pelos valores máximo e mínimo registados;
10. A gama para três níveis pode ser definida pelo valor mínimo, por um valor nominal e pelo valor máximo;
11. Ajustar os valores mínimo e máximo de forma a que o valor nominal seja o ponto central de ambos. No entanto, há situações** em que o valor nominal está afastado do ponto central e, nesse caso, deve ser usado o ponto central;
12. Se um fator for testado em mais de 3 níveis, devem ser considerados pontos adicionais posicionados nas zonas de maior interesse;
13. Repetir os passos de 5 a 13 para os restantes níveis.

* Incrementos do fator em 5% ou 10%, do nível testados ou com outro incremento que seja arbitrado em função da experiência.

** Dependendo do objetivo da experiência.

Após a realização dos testes pré-experimentais para este caso de estudo, os níveis e gamas dos fatores selecionados ficaram objetivamente definidos, como mostrado na Tabela V.

Tabela V – Níveis dos fatores de controlo

Factor de Controlo	*Mínimo	*Nominal	*Máximo
Corrente	611	650	666
Força	104	112	115
Velocidade linear	120	151	166
Distância entre corpos	0.25	5.2	13

* Devido a cláusulas de confidencialidade, os valores reais não são apresentados

Esta abordagem permitiu assim obter os níveis e as gamas de cada fator de controlo de forma mais sistemática, permitindo assim uma melhor seleção do modelo a escolher (4º passo), e consecutivamente, uma melhoria do desempenho na condução da experiência (5º passo). Estes passos fazem parte dos desenvolvimentos futuros no âmbito do projeto de investigação que está em curso.

6. Conclusões

Os principais objetivos da fase inicial de planeamento de um projeto de aplicação de DoE compreende sempre uma definição clara e inequívoca do problema de qualidade a analisar, bem como a seleção correta dos fatores a incluir na experiência, quais os níveis a considerar na condução da experiência e respetivas gamas de experimentação. Uma vez identificada a região de interesse, há várias técnicas possíveis há muito utilizadas para a identificação dos fatores a considerar, com particular destaque para o diagrama de causa-e-efeito, FMEA ou QFD. Com um objetivo similar mas com a particular preocupação de conseguir uma compreensão global de todo o processo industrial, assaz complexo, utilizou-se uma ferramenta da área dos sistemas de engenharia denominada Matriz das Não-Conformidades (NCM), matriz que foi usada pela primeira vez no contexto de um projeto de melhoria da qualidade. Esta ferramenta modela todo o sistema de forma holística, realçando áreas problemáticas do processo, através de uma análise sistemática das não-conformidades produzidas nas várias etapas do processo produtivo.

Esta abordagem foi utilizada num caso industrial de produção de aerossóis em folha-de-flandres de uma grande empresa nacional, particularmente ativa na procura de uma melhoria contínua dos seus produtos e processos. A aplicação da NCM conjuntamente com análises de Pareto sistemáticas, mostraram que a maioria dos problemas ocorreu no processo de soldadura, processo fundamental na qualidade do produto final. No entanto, estudando o processo de soldadura com maior detalhe, percebeu-se que devido a fatores de ruído com comportamentos imprevisíveis e ao facto de todas as variáveis do processo não estarem completamente monitorizadas, não era possível definir com precisão os níveis e as gamas de experimentação dos fatores identificados. Este problema foi resolvido com a implementação de testes pré-experimentais, criando-se um conjunto de directrizes simples para a sua execução, conseguindo-se assim uma definição mais rigorosa dos níveis a considerar para a execução dos testes de DoE.

A escolha do modelo correto e a prossecução das seguintes fases do planeamento de experiências (quadro II), fornecerá indicações fundamentais para quais as melhores condições

para o processo de soldadura que minimizam as não-conformidades nos aerossóis de folha-de-flandres.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Colep, uma empresa líder na manufatura de aerossóis em folha-de-flandres, ativamente envolvida com o programa “Engineering Design and Advanced Manufacturing” (EDAM) do programa MIT-Portugal Program. Muhammad Arsalan Farooq agradece igualmente o suporte da Fundação para a Ciência e Tecnologia, e da bolsa de investigação SFRH/BD/51579/2011. Agradecimentos adicionais ao programa MIT-Portugal Program (www.mitportugal.org).

Nota Final

Este artigo é uma adaptação para português do artigo apresentado na conferência ICEQM (1st International Conference on Quality Engineering and Management), Guimarães, 2014.

Referências Bibliográficas

- Antony, J., 1999. Improving the wire bonding process quality using statistically designed experiments. *Microelectronics Journal*, 30(2), pp.161–168.
- Browning, T.R., 2001. Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 48(3), pp.292–306.
- Coleman, D.E. & Montgomery, D.C., 1993. Industrial Experiment A Systematic Approach to Planning for a Designed Industrial Experiment. In *Technometrics*. pp. 1–12.
- Costa, N.R.P., Pires, A.R. & Ribeiro, C.O., 2006. Guidelines to help practitioners of design of experiments. *The TQM Magazine*, 18(4), pp.386–399.
- Czitrom, V., 2003. Guidelines for Selecting Factors and Factor Levels for an Industrial Designed Experiment. In *Handbook of Statistics*. pp. 3–32.
- Fahmy, R. et al., 2012. Quality by design I: Application of failure mode effect analysis (FMEA) and Plackett-Burman design of experiments in the identification of “main factors” in the formulation and process design space for roller-compacted ciprofloxacin hydrochloride immediate. *AAPS PharmSciTech*, 13(4), pp.1243–54.
- Farooq, A. et al., 2014. An application of Knowledge Management in Design Structure Matrix for a process improvement phase. In *16th International Dependency and Structure Modelling Conference, DSM*. Paris: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- Farooq, A. et al., 2013. Evaluation of a non-conformity matrix complexity using components modularity metrics. In *15th International Dependency and Structure Modelling Conference, DSM*. Melbourne: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, pp. 19–25.
- Fowlkes, W.Y. & Creveling, C.M., 1996. Engineering methods for robust product design: Using taguchi methods in technology and product development. *Journal of Product Innovation Management*, 13(3), p.279.
- Freeman, L.J. et al., 2013. A Tutorial on the Planning of Experiments. *Quality Engineering*, 25(4), pp.315–332.
- Hassan, A. et al., 2010. Conceptual process planning – an improvement approach using QFD, FMEA, and ABC methods. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(4), pp.392–401.
- Javorsky, J., Franchetti, M. & Zhang, H., 2014. Determining the optimal parameters of bonding polyvinylchloride to stainless steel in automotive applications with the use of full factorial design of experiment. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 7(2), pp.151–158.
- Konda, R. & Guha, A., 1998. Design of experiments to study and optimize process performance. , 16(1), pp.56–71.

- Montgomery, D.C., 2008. *Design and Analysis of Experiments* 7th Edition., Wiley, New York.
- Montgomery, D.C. et al., 2000. Using statistically designed experiments for process development and improvement: an application in electronics manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 16(1), pp.55–63.
- Simpson, J.R., Listak, C.M. & Hutto, G.T., 2013. Guidelines for Planning and Evidence for Assessing a Well-Designed Experiment. *Quality Engineering*, 25(4), pp.333–355.
- Steven D. Eppinger & Tyson R. Browning, 2012. *Design structure matrix methods and applications*,
- Subulan, K. & Cakmakci, M., 2011. A feasibility study using simulation-based optimization and Taguchi experimental design method for material handling—transfer system in the automobile industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(5-8), pp.433–443.
- Taguchi, G., Chowdhury, S. & Wu, Y., 2005. *Taguchi 's Quality Engineering Handbook*, John Wiley & Sons, Inc.
- Tanco, M. et al., 2009. Implementation of Design of Experiments projects in industry. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 25(4), pp.478–505.
- Tavares, S.M.O. et al., 2013. Application of non-conformity matrix to predict system interactions in complex quality problems. In *Flexible Automation Integrated Manufacturing (FAIM)*. Porto: Springer, pp. 839–850.

Authors Profiles:

Muhammad Arsalan Farooq is a Ph.D. researcher at the Engineering Faculty of University of Porto under the framework of MIT Portugal Program (MPP). His Ph.D. work, which is sponsored by COLEP (a consumer goods industry), is to apply engineering systems approaches for quality improvement of manufacturing systems. He is currently pursuing his research at Massachusetts Institute of Technology in the USA as part of the MPP. He has worked with Indus Motor Company (Toyota) and GlaxoSmithKline after graduation. His areas of interest include process and product quality improvement, design of experiments, six sigma, statistical techniques and analysis, project management.

Henriqueta Nóvoa has received a Ph.D. from the Engineering Faculty of the University of Porto in 2000 and she is an Assistant Professor at the Industrial and Engineering Department of the University of Porto. She has worked as a production test engineer at Texas Instruments Portugal for 6 years before joining the University (1983-1989). Her research interests are in the areas Strategic Planning of Information Systems and, more recently, Quality Management and Statistical Methods for Quality Improvement.

Sérgio Tavares got his Ph.D. from University of Porto in context of MIT-Portugal Program in 2011. Currently, he is senior researcher at Institute of Mechanical Engineering and Industrial Management and his experience has accumulated in different places including HZG in Germany, University of Pisa in Italy, Massachusetts Institute of Technology in USA and at Airbus in Germany. His research interests include advanced manufacturing processes, computational mechanics, and fatigue and fracture mechanics.

António Araújo has received a PhD from the Engineering Faculty of the University of Porto in 2014. He works since 2013 as consultant for Ford's John Andrews Development Centre in Cologne, Germany, while part time teaching at the Mechanical Engineering Department of the University of Porto in the MIT-Portugal Program. He

worked previously 4 years as full time Invited Professor at the MIT-Portugal Program, 10 years at the Toyota Formula 1 team in Cologne and 3 years at the European Space Agency in the Netherlands.