

## Introdução

Nos experimentos planejados, considera-se normalmente que as rodadas são realizadas de forma completamente aleatorizadas. Isso significa que as corridas são executadas de forma aleatória, e os níveis dos fatores são reinicializados em cada uma das rodadas do experimento. Se pelo menos uma dessas características não ocorrer, é considerada a existência de restrição na aleatorização.

Segundo Webb *et al.* (2004), é muito comum, na indústria, que os níveis dos fatores não sejam reinicializados de uma rodada para a outra, em um experimento. As principais causas para a não reinicialização dos níveis dos fatores são tempo e custo. Segundo estes autores, pelo menos um fator não é reinicializado na maioria dos experimentos. Para Myers & Montgomery (2002), um experimento completamente aleatorizado é, geralmente, muito difícil de ser conduzido. Torna-se praticamente inviável quando existem fatores cujos níveis são difíceis de mudar ou controlar.

Quando o objetivo é construir modelos com base nos resultados de um experimento, é necessário ficar atento à questão da restrição na aleatorização e suas implicações. Isso porque, no momento da estimação dos parâmetros, o fato dos níveis de um ou mais fatores serem os mesmos em sucessivas rodadas pode acarretar a quebra da premissa de independência, o que faz com que o método dos mínimos quadrados ordinários produza estimadores viesados, gerando testes e inferências incorretos. Além disso, a não reinicialização dos níveis dos fatores, em sucessivas rodadas, gera perda de precisão na estimativa dos parâmetros e variância maior do que a esperada.

Em situações como essa, onde existe a presença de restrição na aleatorização no experimento realizado, é possível a utilização de modelos mistos para a estimativa dos parâmetros desejados. Tais modelos consideram a existência de efeitos fixos e aleatórios e permitem o uso de diferentes tipos de estrutura para

a matriz de covariância, optando-se por aquela que melhor representa a estrutura de correlação presente nos dados. Dessa forma, pode-se trabalhar com dados onde as observações são correlacionadas, como ocorre quando há medidas repetidas e sem reinicialização dos níveis dos fatores.

## 1.1

### **Aplicação de Modelos Mistos**

Nesta dissertação será aplicada a modelagem mista aos dados de um estudo de caso no qual houve a realização de um experimento com restrição na aleatorização. Tal experimento trata da medição da espessura de um determinado material, utilizado na fabricação das latas de duas peças, utilizadas para bebidas carbonatadas.

O material citado é resultante de um processo de laminação a frio, que consiste em reduzir a espessura da folha-de-flandres (folha laminada de aço com baixo teor de carbono) dentro das tolerâncias especificadas junto aos clientes. A matéria prima para este processo é uma bobina previamente laminada a quente. Nesse procedimento, um fator importante observado ao longo do tempo, pelos pesquisadores, foi o controle da espessura de tal material, uma vez que variações – para mais e para menos - na espessura, comprometem a qualidade do produto.

Utilizando ferramentas avançadas e com o conhecimento do processo, foi realizado por Gomes (2007), na CSN (Companhia Siderúrgica Nacional), um experimento buscando identificar, dentre algumas variáveis controláveis, quais teriam maior influência na variação da espessura, objetivando a definição de uma faixa ótima de trabalho para as variáveis em questão.

A motivação para a realização do experimento residia no fato dos custos serem extremamente elevados para investimentos na aquisição de equipamentos na indústria de aço. Dessa forma, a economia resultante da melhora no processo, evitando a aquisição de equipamentos, é bastante relevante. Além disso, ao dominar o processo de fabricação do aço, torna-se possível uma melhora competitiva para uma indústria que não possui a mesma tecnologia de ponta, quando comparada com uma concorrente com equipamentos superiores, mas cujos técnicos não exploram em profundidade o binômio processo-equipamento.

Diante disso, também se tem como motivação a melhoria da qualidade (Gomes, 2007).

Sendo tal experimento fundamental para a identificação das variáveis que mais afetam a espessura, possibilitando com isso a redução da sua variação, e garantindo que o produto esteja dentro das especificações, e ainda considerando que tal experimento possui restrição na aleatorização, torna-se relevante a aplicação de uma modelagem adequada aos dados.

## 1.2

### Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo central tratar da questão da restrição na aleatorização em experimentos planejados, propondo como solução para o problema a abordagem de modelos mistos. Para isso, serão aplicados modelos mistos aos dados gerados a partir de um estudo de caso, onde o objetivo é modelar a média e a variância da espessura do material utilizado na fabricação de latas de duas peças.

Os dados utilizados são provenientes de um experimento realizado na CSN. Com isso, busca-se verificar se tal método surte efeito na modelagem dos dados provenientes de um experimento, quando este apresenta restrição na aleatorização.

Dessa forma, as questões presentes nesta dissertação são as seguintes:

- (i) O modelo elaborado para a média e para a variância da espessura do material utilizado na fabricação de latas de duas peças, utilizando a abordagem de modelos mistos, é adequado?
- (ii) Quais fatores, e interações entre os fatores, exercem maior influência na determinação da espessura média do material utilizado na fabricação de latas de duas peças?
- (iii) Quais fatores, e interações entre os fatores, causam maior impacto na variância da espessura do material utilizado na fabricação de latas de duas peças?

### 1.3

#### **Delimitação do estudo**

A presente dissertação pretende abordar a aplicação de modelos mistos em um problema específico, onde se deseja modelar a média e a variância da espessura do material utilizado na fabricação de latas de duas peças.

Existem diversos fatores que podem impactar na determinação da média da espessura do material em questão, produzido em um sistema de laminação a frio. Porém, tal estudo trata apenas de cinco fatores, assim como suas interações de segunda ordem.

Vale mencionar, também, que não se pretende criticar a forma com que o experimento foi conduzido, pois foge às características definidas pelo escopo do presente trabalho.

### 1.4

#### **Relevância do Estudo**

A restrição na aleatorização é uma característica presente em muitos experimentos planejados. Para a modelagem de dados provenientes de um experimento com restrição na aleatorização, deve-se ter alguns cuidados, uma vez que tal problema pode acarretar a quebra da premissa de independência. Isso torna o método dos mínimos quadrados ordinários inadequado para utilização, pois nesse caso ele produz estimadores viesados, gerando testes e inferências incorretos (Webb *et al.*, 2004). Dessa forma, ao abordar tal questão propondo a utilização de modelos mistos, estamos contribuindo com uma solução para este problema. Ou seja, a modelagem mista constrói modelos que representam melhor os dados provenientes de experimentos com restrição na aleatorização. Sendo assim, é possível tomar melhores decisões a partir das previsões geradas por tais modelos.

Em relação ao estudo de caso utilizado, o mesmo é relevante ao permitir que a identificação de alguns ajustes no equipamento, a partir das variáveis controláveis, proporcionem uma melhor qualidade do produto. Isso faz com que

se aumente a competitividade sem a necessidade da aquisição de novos equipamentos. Dessa forma é relevante a aplicação de técnicas estatísticas na identificação de fatores que influenciam nas características de qualidade do produto em questão. Além disso, com a modernização dos conceitos de qualidade, tendo a variância mínima como sinônimo de qualidade, a análise dos fatores que afetam a variância da resposta é objeto de interesse. (Vieira e Epprecht; 2009)

## 1.5

### **Estrutura da Dissertação**

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos, incluindo o capítulo introdutório que apresenta o enfoque central. O Capítulo 2 aborda a questão da restrição na aleatorização em planejamento de experimentos. Além disso, é apresentada a utilização de modelos mistos como uma solução para a estimação dos parâmetros quando ocorre restrição na aleatorização nas rodadas do experimento.

O Capítulo 3 apresenta o estudo de caso, que consiste em um experimento planejado envolvendo um processo de laminação a frio. Tal processo produz chapas para a confecção de latas para bebidas carbonatadas. Para isso é realizada uma descrição do processo produtivo do setor de laminação a frio, visando proporcionar uma melhor compreensão das principais variáveis envolvidas nesse processo. São apresentadas as variáveis controláveis do processo de laminação, assim como os sistemas de controle da espessura do material utilizado na fabricação das latas. E, por fim, é apresentado o resultado do experimento fatorial que foi realizado, assim como seus problemas de aleatorização - o foco deste estudo.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados da modelagem da média e da variância da espessura do material utilizado na fabricação de latas de duas peças, utilizando modelos lineares mistos. Este capítulo está dividido em três seções, onde é descrito como foi selecionado o modelo para a média e para a variância, incluindo as estruturas utilizadas para a matriz de covariância. Além disso, é apresentada a análise dos resíduos para os modelos em questão.

Na conclusão, Capítulo 5, são avaliadas as questões levantadas, que correspondem ao foco central desta dissertação. Além disso, são feitas algumas sugestões para futuros estudos.