

# Otimização do Preparo de Pipocas: Análise dos Fatores Influentes no Estouro de Grãos

Luiz Felipe de Oliveira Barbosa Nunes - 255403

Enzo Putton Tortelli - 204256

Felipe Camilo de Queiroz - 222006

Felipe Scalabrin Dosso - 236110

## 1 Introdução

A proposta deste trabalho é aplicar os conceitos teóricos aprendidos em sala de aula sobre planejamento de experimentos através da análise da eficácia de diferentes métodos de preparo de pipoca. O objetivo do experimento é determinar como diferentes fatores influenciam a quantidade de pipocas não estouradas, visando otimizar o processo de preparo.

A variável resposta principal é a quantidade de pipocas não estouradas após o tempo de cozimento determinado, medida manualmente contando o número de pipocas que não estouraram após cada teste. Além disso, o peso das pipocas não estouradas também foi registrado para proporcionar uma análise mais detalhada.

Para conduzir o experimento, utilizamos uma quantidade fixa de 50g de milho de pipoca para cada teste, e o tempo de cozimento foi controlado desligando o fogo após quatro segundos sem que nenhuma pipoca estourasse. Mantivemos o tipo de óleo constante em todos os testes para evitar variações não controladas. Após cada sessão de cozimento, contamos manualmente o número de pipocas que não estouraram e medimos seu peso. Adicionalmente, a panela foi lavada após cada experimento para garantir condições de limpeza e resfriamento adequadas.

Os códigos e o banco de dados utilizados neste estudo estão disponíveis no GitHub: <https://github.com/LuizNunes2020/TrabPP>.

### 1.1 Materiais

- Panela de modelo único
- Dois tipos de pipocas (premium e normal)
- Óleo (13ml ou sem óleo)
- Fogão com controle ajustável de temperatura

### 1.2 Fatores e Níveis

- **Tipo de pipoca:** normal ou premium
- **Quantidade de óleo:** sem óleo ou com óleo
- **Intensidade da chama:** baixa ou média
- **Mexer durante o cozimento:** sim ou não
- **Blocos:** dia 1 e dia 2

### 1.3 Expectativas e Interações

Espera-se que o tipo de pipoca, a quantidade de óleo, a intensidade da chama e a ação de mexer ou não durante o cozimento tenham efeitos significativos sobre a variável resposta. A experiência prévia sugere que a pipoca premium e o uso de óleo resultem em menos pipocas não estouradas. Interações entre esses fatores também são esperadas, por exemplo, o efeito da intensidade da chama pode depender da presença de óleo, e mexer a pipoca pode ter um impacto maior quando a chama é mais intensa.

Além disso, observamos que as pipocas ficam mais queimadas quando preparadas sem óleo e com fogo médio, resultando em uma qualidade inferior.

## 2 Metodologia

### 2.1 Modelo Experimental

Este experimento é um experimento fatorial  $2^k$  com bloco completo e balanceado, onde  $k$  representa o número de fatores estudados. No nosso caso, temos cinco fatores: Tipo de pipoca, Quantidade de óleo, Intensidade da chama, Mexer durante o cozimento, e Blocos. Cada fator possui dois níveis, resultando em um total de  $2^5 = 32$  combinações possíveis de tratamentos.

O modelo linear para o experimento pode ser escrito da seguinte forma:

$$\begin{aligned} y_{ijklm} = & \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + \zeta_m \\ & + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\tau\delta)_{il} + (\tau\zeta)_{im} \\ & + (\beta\gamma)_{jk} + (\beta\delta)_{jl} + (\beta\zeta)_{jm} + (\gamma\delta)_{kl} + (\gamma\zeta)_{km} + (\delta\zeta)_{lm} \\ & + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + (\tau\beta\delta)_{ijl} + (\tau\beta\zeta)_{ijm} + (\tau\gamma\delta)_{ikl} + (\tau\gamma\zeta)_{ikm} + (\tau\delta\zeta)_{ilm} \\ & + (\beta\gamma\delta)_{jkl} + (\beta\gamma\zeta)_{jkm} + (\beta\delta\zeta)_{jlm} + (\gamma\delta\zeta)_{klm} \\ & + (\tau\beta\gamma\delta)_{ijkl} + (\tau\beta\gamma\zeta)_{ijkm} + (\tau\beta\delta\zeta)_{ijlm} + (\tau\gamma\delta\zeta)_{iklm} + (\beta\gamma\delta\zeta)_{jklm} \\ & + (\tau\beta\gamma\delta\zeta)_{ijklm} + \epsilon_{ijklm} \end{aligned}$$

onde:

- $y_{ijklm}$  é o peso dos grãos não estourados para o  $i$ -ésimo tipo de pipoca,  $j$ -ésima quantidade de óleo,  $k$ -ésima intensidade da chama,  $l$ -ésima condição de mexer ou não, e  $m$ -ésimo bloco.
- $\mu$  é a média geral.
- $\tau_i$  é o efeito do  $i$ -ésimo tipo de pipoca ( $i = 1, 2$ ).
- $\beta_j$  é o efeito da  $j$ -ésima quantidade de óleo ( $j = 1, 2$ ).
- $\gamma_k$  é o efeito da  $k$ -ésima intensidade da chama ( $k = 1, 2$ ).
- $\delta_l$  é o efeito da  $l$ -ésima condição de mexer ou não ( $l = 1, 2$ ).
- $\zeta_m$  é o efeito do  $m$ -ésimo bloco ( $m = 1, 2$ ).
- $(\tau\beta)_{ij}$ ,  $(\tau\gamma)_{ik}$ ,  $(\tau\delta)_{il}$ ,  $(\tau\zeta)_{im}$ ,  $(\beta\gamma)_{jk}$ ,  $(\beta\delta)_{jl}$ ,  $(\beta\zeta)_{jm}$ ,  $(\gamma\delta)_{kl}$ ,  $(\gamma\zeta)_{km}$ ,  $(\delta\zeta)_{lm}$  são os efeitos de interação de dois fatores.
- $(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ ,  $(\tau\beta\delta)_{ijl}$ ,  $(\tau\beta\zeta)_{ijm}$ ,  $(\tau\gamma\delta)_{ikl}$ ,  $(\tau\gamma\zeta)_{ikm}$ ,  $(\tau\delta\zeta)_{ilm}$ ,  $(\beta\gamma\delta)_{jkl}$ ,  $(\beta\gamma\zeta)_{jkm}$ ,  $(\beta\delta\zeta)_{jlm}$ ,  $(\gamma\delta\zeta)_{klm}$  são os efeitos de interação de três fatores.
- $(\tau\beta\gamma\delta)_{ijkl}$ ,  $(\tau\beta\gamma\zeta)_{ijkm}$ ,  $(\tau\beta\delta\zeta)_{ijlm}$ ,  $(\tau\gamma\delta\zeta)_{iklm}$ ,  $(\beta\gamma\delta\zeta)_{jklm}$  são os efeitos de interação de quatro fatores.
- $(\tau\beta\gamma\delta\zeta)_{ijklm}$  é o efeito de interação de cinco fatores.
- $\epsilon_{ijklm}$  é o erro experimental associado à observação  $ijklm$ , assumindo-se que  $\epsilon_{ijklm} \sim N(0, \sigma^2)$ .

## 2.2 Análise

Inicialmente, foi realizada a análise descritiva dos dados utilizando gráficos que representam a quantidade de piruás por níveis de cada fator. Os gráficos descritivos (1) mostram a variação da quantidade de piruás em relação aos fatores Tipo, Óleo, Fogo e Mexer.

Para melhorar a normalidade dos dados e a homocedasticidade dos resíduos, foi realizada uma transformação logarítmica na variável resposta. Esta transformação ajuda a estabilizar a variância e a tornar os dados mais próximos de uma distribuição normal, o que é uma suposição importante para a ANOVA.

Em seguida, foi conduzido um teste ANOVA para identificar quais fatores e interações são significativos, bem como para verificar se há interação entre os fatores e os blocos experimentais. Apenas os fatores significativos foram mantidos na análise subsequente.

Como foram identificadas interações significativas entre alguns fatores, as médias dos níveis de cada fator foram plotadas (2) e testadas quanto a diferenças significativas utilizando o teste de Tukey para todas as combinações dos níveis dos outros fatores.

Por fim, a análise dos resíduos foi realizada através de diversos gráficos: QQ plot, resíduos por ordem de coleta de dados, resíduos por valores ajustados e resíduos por cada um dos fatores (4).

## 3 Análise Descritiva

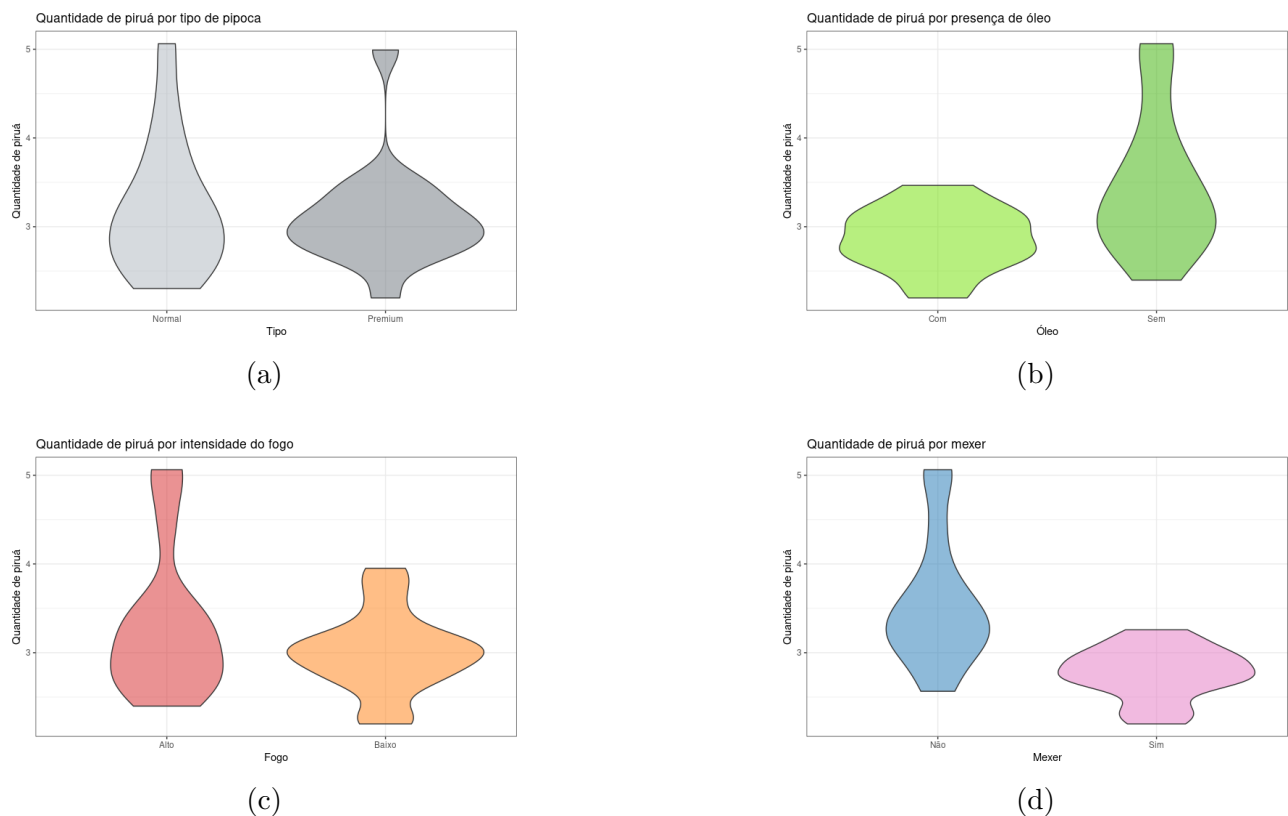


Figura 1: Gráficos descritivos dos fatores

Os gráficos indicam que preparo em fogo baixo, com óleo, mexer na preparação e ser do tipo premium são tratamentos que aparentam produzir menos piruás dada a menor variância, visto que em todos os gráficos a densidade de observações se concentra mais em menores valores sob esses tratamentos.

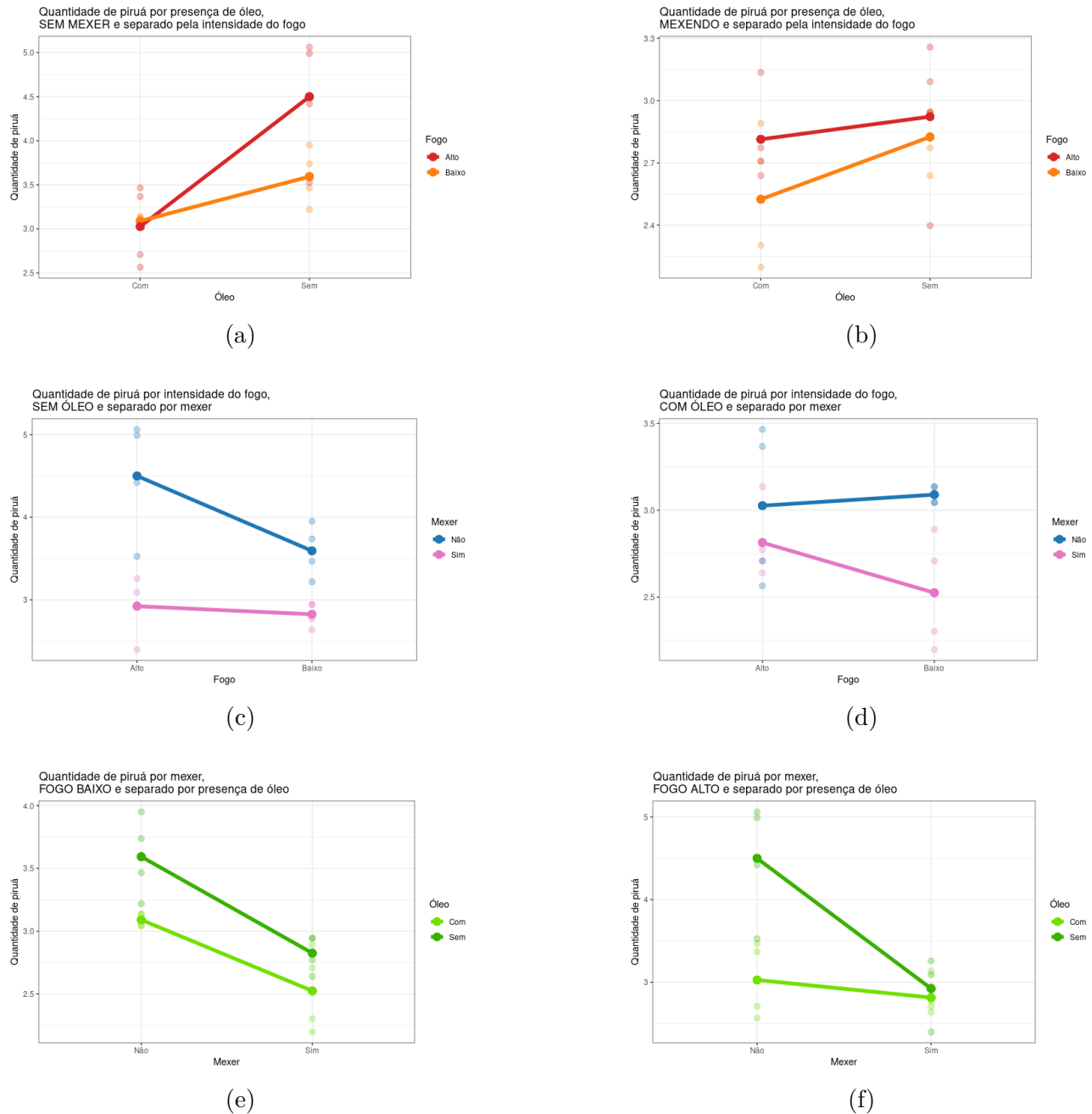


Figura 2: Gráficos de interação

Os gráficos de interação na Figura 2 revelam como os diferentes fatores analisados afetam a quantidade de piruás, medida através da transformação logarítmica da variável resposta. De maneira geral, observamos que a presença de óleo e a ação de mexer a pipoca tendem a reduzir significativamente a quantidade de piruás. Além disso, a intensidade do fogo também apresenta um impacto importante, com fogo baixo geralmente resultando em menos piruás comparado ao fogo alto.

Sem mexer a pipoca, a quantidade de piruás é consideravelmente maior quando o fogo é alto e não se utiliza óleo. No entanto, a adição de óleo reduz a quantidade de piruás, especialmente quando o fogo é baixo. Mexendo a pipoca, a quantidade de piruás é menor, independentemente da presença de óleo, mas ainda há uma diferença notável quando se compara as condições com e sem óleo, especialmente com fogo alto.

Os gráficos também sugerem que a interação entre a intensidade do fogo e a presença de óleo é significativa, com maiores diferenças observadas em fogo alto quando se adiciona óleo. Além disso, a interação entre mexer e a presença de óleo mostra que mexer a pipoca reduz a quantidade de piruás, mas essa redução é mais pronunciada na presença de óleo.

## 4 Resultados

Tabela 1: Tabela ANOVA

Fonte de Variação	GL	Soma dos Quadrados	Média dos Quadrados	Valor F	Pr(>F)
Tipo	1	0.0975	0.0975	0.5598	0.4688
Óleo	1	2.8467	2.8467	16.3459	0.0016 **
Fogo	1	0.7560	0.7560	4.3412	0.0592 .
Mexer	1	4.8769	4.8769	28.0037	0.0002 ***
Replicação	1	0.0939	0.0939	0.5392	0.4769
Tipo:Óleo	1	0.0410	0.0410	0.2355	0.6362
Tipo:Fogo	1	0.0010	0.0010	0.0057	0.9409
Óleo:Fogo	1	0.3028	0.3028	1.7386	0.2119
Tipo:Mexer	1	0.1355	0.1355	0.7781	0.3950
Óleo:Mexer	1	1.2274	1.2274	7.0479	0.0210 *
Fogo:Mexer	1	0.1038	0.1038	0.5962	0.4550
Óleo:Replicação	1	0.4859	0.4859	2.7899	0.1207
Fogo:Replicação	1	0.1142	0.1142	0.6555	0.4339
Mexer:Replicação	1	0.0446	0.0446	0.2562	0.6219
Tipo:Óleo:Fogo	1	0.0176	0.0176	0.1009	0.7562
Tipo:Óleo:Mexer	1	0.2595	0.2595	1.4900	0.2457
Tipo:Fogo:Mexer	1	0.0038	0.0038	0.0216	0.8855
Óleo:Fogo:Mexer	1	0.6742	0.6742	3.8712	0.0727 .
Tipo:Óleo:Fogo:Mexer	1	0.0180	0.0180	0.1036	0.7531
Resíduos	12	2.0898	0.1742		

Observação: Utilizar peso dos piruás ao invés da quantidade gerou os mesmos resultados na ANOVA.

A partir da tabela ANOVA acima, observamos que o fator "Óleo" é altamente significativo ( $F = 16.3459$ ,  $p = 0.0016$ ), indicando que a presença de óleo afeta a quantidade de piruás. O fator "Mexer" também é significativo ( $F = 28.0037$ ,  $p = 0.0002$ ), sugerindo que mexer a pipoca reduz os piruás. O fator "Fogo" mostrou uma tendência ( $p = 0.0592$ ).

A interação entre "Óleo" e "Mexer" foi significativa ( $F = 7.0479$ ,  $p = 0.0210$ ), enquanto outras interações não foram. O fator "Tipo" e suas interações não foram significativos. Os resíduos apresentaram uma soma de quadrados de 2.0898 com 12 graus de liberdade, indicando variabilidade não explicada pelo modelo.

A seguir, temos o novo modelo sem o fator Tipo e as interações que não são significativas

Tabela 2: Tabela de Análise de Variância

Fonte de Variação	GL	Soma dos Quadrados	Média dos Quadrados	Valor F	Pr(>F)
Óleo	1	2.8467	2.8467	19.7905	0.000184 ***
Fogo	1	0.7560	0.7560	5.2560	0.031350 *
Mexer	1	4.8769	4.8769	33.9050	6.213e-06 ***
Replicação	1	0.0939	0.0939	0.6528	0.427390
Óleo:Fogo	1	0.3028	0.3028	2.1050	0.160324
Óleo:Mexer	1	1.2274	1.2274	8.5331	0.007684 **
Fogo:Mexer	1	0.1038	0.1038	0.7219	0.404295
Óleo:Fogo:Mexer	1	0.6742	0.6742	4.6870	0.041013 *
Resíduos	23	3.3083	0.1438		

A partir da nova tabela ANOVA, observamos que os fatores "Óleo" ( $F = 19.7905$ ,  $p = 0.000184$ ) e "Mexer" ( $F = 33.9050$ ,  $p = 6.213e-06$ ) são altamente significativos, indicando que ambos afetam significativamente a quantidade de piruás. O fator "Fogo" também é significativo ( $F = 5.2560$ ,  $p = 0.031350$ ).

A interação entre "Óleo" e "Mexer" ( $F = 8.5331$ ,  $p = 0.007684$ ) e a interação entre "Óleo", "Fogo" e "Mexer" ( $F = 4.6870$ ,  $p = 0.041013$ ) foram significativas, sugerindo efeitos combinados desses fatores. Outras interações não foram significativas. Os resíduos apresentaram uma soma de quadrados de 3.3083 com 23 graus de liberdade, indicando variabilidade não explicada pelo modelo.

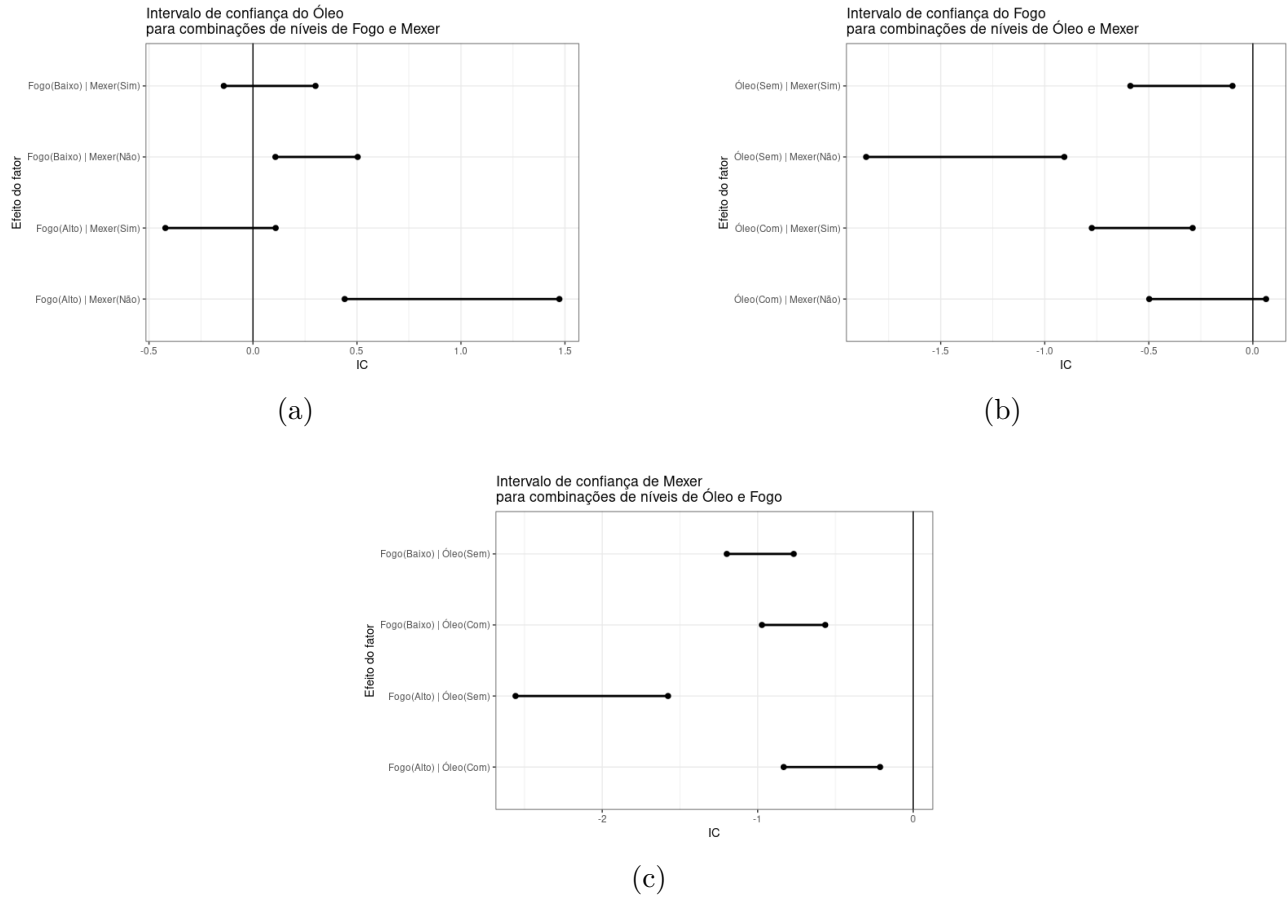


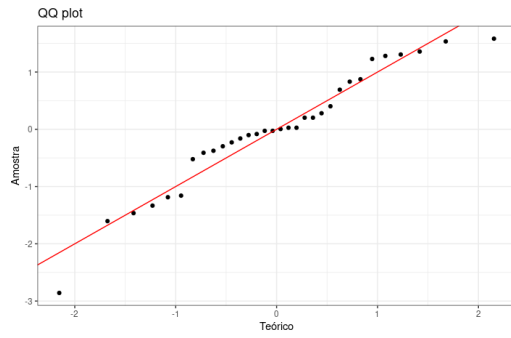
Figura 3: Gráficos do teste de Tukey

Dado que o fator Tipo não é significativo pela ANOVA, ele foi excluído das análises subsequentes. Além disso, a interação tripla foi significativa, exigindo que as comparações em um fator considerem o nível dos demais fatores. Assim, os testes de Tukey foram utilizados para verificar se existe diferença estatística entre as médias dos níveis de um fator, fixando os níveis dos outros dois fatores.

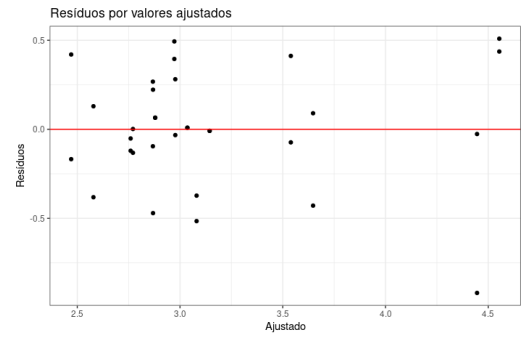
No primeiro gráfico da figura 3, os intervalos de confiança de 95% para  $(\beta_{sem\ óleo} - \beta_{com\ óleo})$  não contêm 0 quando o fogo é baixo e não mexemos, ou quando o fogo é alto e não mexemos. Isso indica que a diferença média na quantidade de piruás entre preparar a pipoca com ou sem óleo é significativa apenas quando não mexemos, com uma maior média de  $\log(\text{quantidade de piruás})$  sem óleo. Essa diferença é intensificada pelo fogo alto, e não é significativa quando mexemos.

No segundo gráfico, quase todos os intervalos de confiança de 95% para  $(\gamma_{fogo\ baixo} - \gamma_{fogo\ alto})$  não contêm 0 e são negativos, exceto quando os efeitos são fixados com óleo e sem mexer. Isso indica que o preparo da pipoca com fogo alto, quando não feito com óleo e sem mexer, difere em média do preparo com fogo baixo, apresentando uma maior média de  $\log(\text{quantidade de piruás})$ .

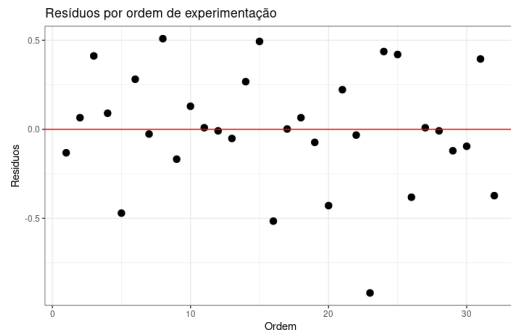
No terceiro gráfico, todos os intervalos de confiança de 95% para  $(\delta_{mexer} - \delta_{não\ mexer})$  não contêm 0 e são negativos em todos os fatores fixados. Isso indica que o preparo da pipoca não mexendo os grãos sempre difere em média do preparo mexendo os grãos, controlando pelos demais fatores, apresentando uma maior média de  $\log(\text{quantidade de piruás})$ .



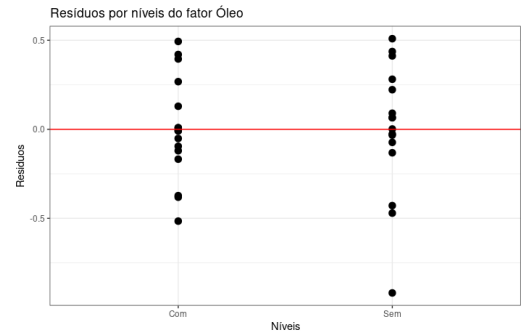
(a)



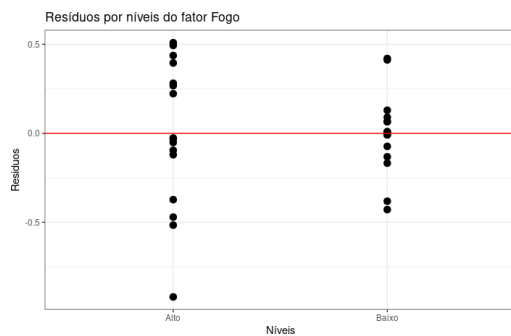
(b)



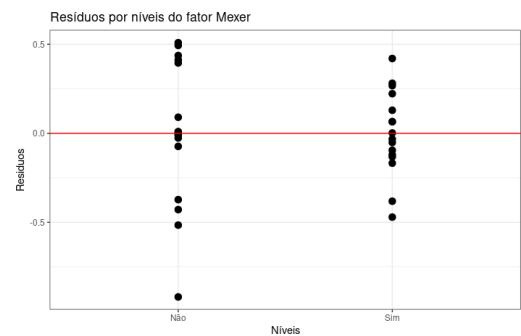
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4: Análise de resíduos

A Figura 4 apresenta seis gráficos de análise de resíduos. O gráfico QQ plot (a) mostra que os resíduos seguem aproximadamente uma distribuição normal, embora haja alguns desvios nas extremidades. O gráfico de resíduos por valores ajustados (b) não indica padrões específicos, sugerindo homocedasticidade.

O gráfico de resíduos por ordem de experimentação (c) mostra que os resíduos estão aleatoriamente distribuídos ao longo do tempo, indicando independência. Os gráficos de resíduos por níveis dos fatores Óleo (d), Fogo (e) e Mexer (f) não apresentam padrões claros, sugerindo que não há influência sistemática desses fatores nos resíduos.

## 5 Conclusão

O experimento foi construído e executado visando determinar como diferentes fatores influenciam na quantidade de pipocas não estouradas, durante a análise exploratória percebemos não só indícios de diferenças nos níveis dos fatores (que pôde ser constatada nos testes de hipótese), mas também indícios de heterocedasticidade nos grupos e interações; tomadas as medidas cabíveis para controle da estabilidade da variância, analisamos os resultados.

Em síntese, o experimento fatorial com bloco completo e balanceado ocorreu de acordo com as expectativas iniciais, sendo constatado significância em fatores de quantidade de óleo, intensidade da chama e a ação de mexer, e também em interações destes fatores, o que corrobora com as hipóteses concebidas acerca do experimento. O fator tipo e suas interações não foram significantes, e apesar de curioso, é um resultado interessante, visto que pipocas premium têm maior valor de mercado. Uma vez constatada diferença entre média de tratamentos, são realizados testes de tukey com o intuito de encontrar tratamentos com diferenças significativas e seus efeitos na variável resposta. Adicionalmente, foi verificado normalidade e estabilidade na variância dos resíduos na análise de resíduos, validando as conclusões chegadas.

Por fim, temos que em caso de uma segunda execução do experimento, uma boa prática seria controlar melhor a estabilidade da variância, e adicionar blocos para diminuir o SQE.

Em resumo, para obter um preparo de pipoca com menos piruás, recomenda-se o uso de óleo e a ação de mexer os grão durante o cozimento, especialmente em condições de fogo alto.



## 6 Fotos



(a)



(b)



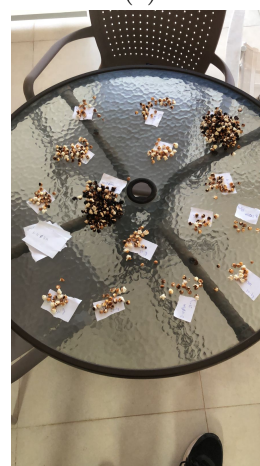
(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 5: Fotos durante o experimento.