



Melhorias Kaizen ? first run yield em produtos texturados e epóxi-poliéster satinados

ANA RITA PEREIRA FILIPE

julho de 2022

Melhorias Kaizen – *first run yield* em produtos texturados e epóxi-poliéster satinados

Dissertação Submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química, área de especificação Qualidade

Julho 2022

AUTOR

Ana Rita Pereira Filipe

ORIENTAÇÃO

Eng.^a Diana Cristina Castro Valdoleiros Pinto de Oliveira – CIN

Eng.^a Susana Maria Ribeiro e Sousa Mendes de Freitas – ISEP

Mestrado em Engenharia Química

EMPRESA ACOLHEDORA



Agradecimentos

A realização desta dissertação só foi possível devido ao apoio de algumas pessoas, às quais estou imensamente grata.

Agradeço à CIN, por me ter dado a oportunidade e meios de realizar este estágio, que me fez crescer profissional e pessoalmente.

À Eng.^a Diana Valdoleiros, um especial obrigado, pela orientação, disponibilidade e incentivo constantes. Ao Eng.º Rogério Amorim por todo o apoio prestado ao longo destes meses. Ao Eng.º Vasco Coelho por todas as sugestões que visavam a melhoria do projeto.

A toda a equipa da CIN Megadur, da produção e do Laboratório de Controlo de Qualidade, pelo excelente acolhimento, pelo constante apoio e por me proporcionarem aprendizagem com o ótimo ambiente de companheirismo e boa disposição.

À Eng.^a Susana Freitas por ter demonstrado sempre disponibilidade, por me ter acompanhado ao longo deste projeto e por me ajudar a melhorar continuamente.

À minha família e amigos pelo apoio e encorajamento incondicional, e por estarem sempre ao meu lado.

A todos, muito obrigada!

Resumo

A presente dissertação foi desenvolvida na empresa CIN Industrial Coatings, S.A., com o objetivo de eliminar a falta de reprodutibilidade entre a fase da aprovação de pré mistura (APM) e a produção, essencialmente observada nos produtos texturados e epóxi-poliéster satinados.

A paragem da linha de produção destes produtos críticos afeta negativamente a produtividade da empresa e, conseqüentemente, a *Overall Equipment Effectiveness* (OEE). Deste modo, surge na empresa o indicador *Non Stop Yield (NSY)*, com o intuito de quantificar o número de vezes que a produção não para para controlo de qualidade. Assim, percebe-se que o NSY está diretamente relacionado com a OEE, pelo que se pretende reduzir o número de paragens da linha de produção.

Inicialmente foi necessário ter em conta as variáveis do processo e amostragem dos produtos críticos em estudo, com o intuito de definir as condições ótimas que garantissem a repetibilidade e reprodutibilidade do brilho na APM e na produção.

Para tal, traçou-se um desenho de experiências, verificando-se inicialmente que determinados fatores não influenciavam significativamente o valor do brilho, nomeadamente, a localização na qual é extraída a amostra, a influência das extrusões serem efetuadas de forma sequencial e a temperatura da pasta à saída da extrusora. De seguida, através do software *Minitab* efetuou-se o desenho de experiências, em que se definiram três fatores controláveis que evidenciavam influência na extrusora da APM, denominados por fator X, Y e Z. Estabeleceram-se três níveis para o fator X, de 70, 90 e 120 e dois níveis para o fator Y, de 150 e 250.

Utilizou-se o método DMAIC para a resolução do problema em questão, pelo que na etapa *Define* está definido o problema; na etapa *Measure*, o método utilizado para a realização dos ensaios do desenho de experiência; na fase do *Analyse* está representado o diagrama de Ishikawa, bem como a análise da variância e na etapa *Improve* a análise da regressão obtida para cada produto. De notar que não se incluiu a última etapa deste método, a etapa *Control*, uma vez que as condições estudadas não permitiram uma reprodutibilidade ideal entre a APM e a produção. Concluiu-se, assim, que é necessária uma continuidade deste estudo, de modo a aumentar o NSY.

Palavras-chave: tintas em pó, brilho, testes de hipóteses, análise de regressão.

Abstract

This dissertation was developed in cooperation with CIN Industrial Coatings, S.A. and the key issue addressed in this project was to eradicate the lack of reproducibility between the raw materials approval (RMA) phase and production, essentially observed in textured and epoxy-polyester satin products.

When the production line is stopped due to these critical products, the company's production is negatively affected and consequently, the Overall Equipment Effectiveness (OEE). Therefore, the Non Stop Yield (NSY) indicator arises in the company, with the purpose of quantifying the number of times that production is not interrupted. Since the NSY is directly related to the OEE, the intention would be to reduce the number of production line stops.

Initially it was necessary to take into account the process variables and sampling in the critical products, in order to define the optimal conditions that would guarantee the repeatability and reproducibility of the brightness in RMA and in production.

Circumscribed in this context, an experimental investigation was outlined with the purpose of verifying that certain factors did not significantly influence the gloss value, namely, the location from where the sample is extracted, the influence of using a sequential extrusions procedure and the temperature of the paste at the extruder outlet. Subsequently, an experimental investigation of the processing parameters was conducted using Design of Experiments in Minitab Software, which were defined three controllable factors that influenced the RMA extruder, named factor X, Y and Z. Three levels were established for factor X, 70, 90 and 120, and two levels for factor Y, 150 and 250.

The DMAIC method was used to solve the main problem in this project. This procedure comprises the step of Define, where the problem is defined; in the Measure stage, the method used to carry out the experiment design tests; in the Analyse stage the Ishikawa diagram is represented, as well as the variance analysis and in the Improve stage the regression analysis obtained for each product. It should be emphasized that the last stage of this method, the step Control, was not included, since the conditions studied did not allow for optimal reproducibility between the RMA and the production. Eventually, it was concluded that a continuity of this study is required to increase the NSY.

Keywords: powder paints, gloss, hypothesis testing, regression analysis.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Organização da tese	1
1.3. Empresa - CIN INDUSTRIAL COATINGS, S.A.	2
1.4. Melhoria Contínua	3
1.4.1. Princípios <i>Lean</i>	3
1.4.2. Ferramentas <i>Kaizen</i>	4
2. Introdução teórica	11
2.1. Tintas em pó.....	11
2.2. Composição das tintas em pó.....	11
2.2.1. Resinas	11
2.2.2. Pigmentos.....	14
2.2.3. Endurecedores	14
2.2.4. Cargas.....	14
2.2.5. Aditivos	14
2.4. Processo de fabrico	15
2.5. Controlo de qualidade das tintas em pó	17
2.5.1. Cor.....	17
2.5.2. Espessura do revestimento	18
2.5.3. Brilho.....	19
2.6. Técnicas de aplicação	20
3. DMAIC	23
3.1. <i>Define</i>	23
3.1.1. Aprovação de Pré-Mistura	23
3.1.2. Desenho de Experiências	27
3.2. <i>Measure</i>	30

3.2.1. Método	31
3.3. <i>Analyse</i>	32
3.3.1. Diagrama de Ishikawa	32
3.3.2. ANOVA	34
3.4. <i>Improve</i>	50
3.4.1. Análise do Desenho de Experiências	51
3.4.2. Estudo da repetibilidade	54
Conclusão	57
Referências Bibliográficas	59
Anexos	65
Anexo A – Resultados relativos ao produto A	65
Anexo B - Resultados relativos ao produto B	68
Anexo C - Resultados relativos ao produto C	71
Anexo D - Resultados relativos ao produto D	74
Anexo E - Resultados relativos ao produto E	77
Anexo F - Resultados relativos ao produto F	80
Anexo G - Resultados relativos ao produto G	83
Anexo H - Resultados relativos ao produto H	86
Anexo I - Resultados relativos ao produto I	89
Anexo J - Resultados relativos ao produto J	92
Anexo K - Resultados relativos ao produto K	95
Anexo L – Estudo da repetibilidade	98

Índice de Figuras

Figura 1.1 Ilustração do Ciclo PDCA [8].	6
Figura 1.2 Ilustração das etapas do método DMAIC [11].	7
Figura 1.3 Passos da metodologia 3C. [Adaptado de [12]]	8
Figura 1.4 Fluxograma do procedimento da análise 5W. [Adaptado de[3]]	9
Figura 2.1 Estrutura química da resina epóxi obtida através da reação de epíclorídrica e bisfenol A[18].	12
Figura 2.2 Estrutura química do poliéster resultante de esterificação direta de poliácidos com poliálcoois. (Adaptado de[21])	13
Figura 2.3 Esquema representativo do processo de fabrico das tintas em pó. (Adaptado de[21]).	15
Figura 2.4 Testes realizados no controlo de qualidade em tintas de pó.	17
Figura 2.5 Carta de cores do sistema RAL [25].	18
Figura 2.6 Medidor de espessura de tinta [27].	19
Figura 2.7 Determinação do brilho através de um medidor de brilho [30].	20
Figura 2.8 Representação da refletância especular (à esquerda) e difusa (à direita)[31].	20
Figura 2.9 Esquema representativo do processo de aplicação eletrostática com pistola (Corona). (Adaptado de[21])	21
Figura 2.10 Esquema representativo do funcionamento de uma pistola triboelétrica. (Adaptado de [33]).	22
Figura 2.11 Esquema representativo da aplicação através do processo de leito fluidizado. (Adaptado de [21])	22
Figura 3.1 Fusos da extrusora dos tons escuros (à esquerda) e dos tons claros (à direita).	24
Figura 3.2 Fluxograma do processo produtivo incluindo APM em que OF significa ordem de fabrico e MP matéria-prima.	24
Figura 3.3 Registos das paragens na extrusora, devido à produção de epóxi-poliésteres satinados, texturados e outros motivos, e o indicador NSY, representados por linha, em 2020.	25
Figura 3.4 Registos das paragens na extrusora, devido à produção de epóxi-poliésteres satinados, texturados e outros motivos, e o indicador NSY, representados por linha, em 2021.	26

Figura 3.5 Registo do indicador NSY global dos anos de 2020 e de 2021, e respetivos valores objetivos.	26
Figura 3.6 Representação das localizações da amostra no tanque.	27
Figura 3.7 Representação gráfica do valor do brilho o obtido nas amostras de diferentes zonas do tanque.	28
Figura 3.8 Representação gráfica do valor médio do brilho obtido para as 5 extrusões seguidas, paras as extrusões com limpeza posterior e para as extrusões com limpeza realizadas de hora em hora.	29
Figura 3.9 Representação gráfica do valor médio da temperatura da pasta registada para as 5 extrusões seguidas, paras as extrusões com limpeza posterior e para as extrusões com limpeza realizadas de hora em hora.	29
Figura 3.10 Pasta originária do processo de extrusão.	31
Figura 3.11 Pastilha obtida após arrefecimento nos rolos.	31
Figura 3.12 Diagrama de Ishikawa para a falta de reprodutibilidade entre a APM e a produção.	33
Figura 3.13 Teste de Tukey (a) e gráfico boxplot de acordo com as diferentes combinações (b), para o produto A.	38
Figura 3.14 Teste de Tukey (a) e gráfico boxplot de acordo com as diferentes combinações(b), para o produto B.....	40
Figura 3.15 Teste de Tukey (a) e gráfico boxplot de acordo com as diferentes combinações(b), para o produto C.....	41
Figura 3.16 Teste de Tukey (a) e gráfico boxplot de acordo com as diferentes combinações(b), para o produto D.	42
Figura 3.17 Gráfico boxplot de acordo com as diferentes combinações, para o produto E.....	43
Figura 3.18 Gráfico boxplot para o produto F de acordo com as diferentes combinações.	44
Figura 3.19 Gráfico boxplot para o produto G de acordo com as diferentes combinações.	45
Figura 3.20 Representação gráfica dos erros relativos para cada combinação, dos produtos D, E, F e G.....	46
Figura 3.21 Teste de Tukey (a) e gráfico boxplot de acordo com as diferentes combinações(b), para o produto H.	47

Figura 3.22 Teste de Tukey (a) e gráfico boxplot de acordo com as diferentes combinações(b), para o produto I.	48
Figura 3.23 Gráfico boxplot de acordo com as diferentes combinações, para o produto J.	49
Figura 3.24 Teste de Tukey (a) e gráfico boxplot de acordo com as diferentes combinações(b), para o produto K.	50
Figura 3.25 Análise de variância considerando a covariável espessura para o produto D.	54
Figura A. 1 Teste de normalidade dos resíduos para o produto A.	66
Figura A. 2 Teste de igualdade de variâncias para o produto A.....	66
Figura A. 3 ANOVA com um fator para o produto A.....	67
Figura A. 4 Análise da regressão para o produto A.....	67
Figura B. 1 Teste de normalidade dos resíduos para o produto B.....	69
Figura B. 2 Teste de igualdade de variâncias para o produto B.	69
Figura B. 3 ANOVA com um fator para o produto B.	70
Figura B. 4 Análise da regressão para o produto B.	70
Figura C. 1 Teste de normalidade dos resíduos para o produto C.....	72
Figura C. 2 Teste de igualdade de variâncias para o produto C.	72
Figura C. 3 Análise da regressão para o produto C.	73
Figura D. 1 Teste de normalidade dos resíduos para o produto D.	75
Figura D. 2 Teste de igualdade de variâncias para o produto D.....	75
Figura D. 3 Análise da regressão para o produto D.....	76
Figura E. 1 Teste de normalidade dos resíduos para o produto E.	78
Figura E. 2 Teste de igualdade de variâncias para o produto E.....	78
Figura E. 3 Análise da regressão para o produto E.	79
Figura F. 1 Teste de normalidade dos resíduos para o produto F.....	81
Figura F. 2 Teste de igualdade de variâncias para o produto F.	81
Figura F. 3 Análise da regressão para o produto F.....	82
Figura G. 1 Teste de normalidade dos resíduos para o produto G.	84
Figura G. 2 Teste de igualdade de variâncias para o produto G.....	84
Figura G. 3 Análise da regressão do produto G.	85
Figura H. 1 Teste de normalidade dos resíduos para o produto H.	86
Figura H. 2 Teste de igualdade de variâncias para o produto H.....	87
Figura H. 3 Análise da regressão do produto H.	88

Figura I. 1 Teste de normalidade dos resíduos para o produto I.	90
Figura I. 2 Teste de igualdade de variâncias para o produto I.	90
Figura I. 3 Análise da regressão do produto I.	91
Figura J. 1 Teste de normalidade dos resíduos para o produto J.	93
Figura J. 2 Teste de igualdade de variâncias para o produto J.	93
Figura J. 3 Análise da regressão do produto J.	94
Figura K. 1 Teste de normalidade dos resíduos para o produto K.	95
Figura K. 2 Teste de igualdade de variâncias para o produto K.	96
Figura K. 3 Análise da regressão do produto K.	97

Índice de tabelas

Tabela 3.1 Valores obtidos no teste de normalidade dos resíduos (respostas dos testes presentes nos Anexos A.1, B.1, C.1, D.1, E.1, F.1, G.1, H.1, I.1, J.1 e K.1) e no teste de igualdade das variâncias (Anexos A.2, B.2, C.2, D.2, E.2, F.2, G.2, H.2, I.2, J.2 e K.2), para cada produto.....	35
Tabela 3.2 Valores obtidos para o valor-p no teste da ANOVA com um fator para cada produto (respostas dos testes presentes nos Anexos A.3, B.3, C.3, D.3, E.3, F.3, G.3, H.3, I.3, J.3 e K.3).	37
Tabela A. 1 Valores do brilho obtidos para as diferentes combinações e respetivas espessuras, para o produto A.	65
Tabela B. 1 Valores do brilho obtidos para as diferentes combinações e respetivas espessuras, para o produto B.	68
Tabela C. 1 Valores do brilho obtidos para as diferentes combinações e respetivas espessuras, para o produto C.	71
Tabela D. 1 Valores do brilho obtidos para as diferentes combinações e respetivas espessuras, para o produto D.	74
Tabela E. 1 Valores do brilho obtidos para as diferentes combinações e respetivas espessuras, para o produto E.....	77
Tabela F. 1 Valores do brilho obtidos para as diferentes combinações e respetivas espessuras, para o produto F.....	80
Tabela G. 1 Valores do brilho obtidos para as diferentes combinações e respetivas espessuras, para o produto G.	83
Tabela H. 1 Valores do brilho obtidos para as diferentes combinações e respetivas espessuras, para o produto H.	86
Tabela I. 1 Valores do brilho obtidos para as diferentes combinações e respetivas espessuras, para o produto I.....	89
Tabela J. 1 Valores do brilho obtidos para as diferentes combinações e respetivas espessuras, para o produto J.	92
Tabela K. 1 Valores do brilho obtidos para as diferentes combinações e respetivas espessuras, para o produto K.	95
Tabela L. 1 Valores obtidos para o estudo da repetibilidade de um produto liso.	98
Tabela L. 2 Valores obtidos para o estudo da repetibilidade de um produto poliéster texturado.	98

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A presente dissertação foi realizada no âmbito do projeto de estágio do Mestrado em Engenharia Química do Instituto Superior de Engenharia do Porto, na empresa CIN Industrial Coatings, S.A..

Este projeto foi desenvolvido com o intuito de eliminar a falta de reprodutibilidade entre a fase da aprovação de pré mistura, conhecida como APM, e a produção. O foco deste estudo serão os produtos texturados e époxi-poliéster satinados, que se revelam produtos críticos, isto é, são produtos que obrigam a paragem da linha de produção para aprovação, devido à falta de reprodutibilidade mencionada anteriormente.

Considerando a adversidade, percebe-se que a mesma contribua para a diminuição da produtividade da empresa, e consequentemente da OEE (*Overall Equipment Effectiveness*), sendo que este constitui um projeto de extrema relevância para o grupo CIN.

Tendo em vista a resolução do problema, foi necessário um estudo das variáveis do processo e amostragem nos produtos críticos em questão, de modo a definir as condições ótimas que garantem a repetibilidade e reprodutibilidade do resultado na APM e na produção. Isto permitirá fabricar estes produtos com a confiança que serão aprovados à primeira, sem necessidade de correções e/ou evitar produtos não conformes.

1.2. Organização da tese

A dissertação encontra-se dividida em 4 capítulos.

No primeiro capítulo está presente o enquadramento do projeto, a apresentação da empresa, e a filosofia implementada na empresa CIN – U.P. MEGADUR.

No capítulo 2, é apresentada uma introdução teórica que abrange as tintas em pó, a sua composição, o seu processo de fabrico, o controlo de qualidade a que são submetidas e os tipos de aplicações das mesmas.

No terceiro capítulo é apresentado o método empregue para a resolução do problema em questão, tal como a sua caracterização. Neste capítulo são também apresentados os resultados obtidos e a discussão dos mesmos.

Por fim, no último capítulo encontram-se as conclusões retiradas deste projeto e as propostas de trabalho futuro.

1.3. Empresa - CIN INDUSTRIAL COATINGS, S.A.

A CIN, Corporação Industrial do Norte, S.A., é uma empresa portuguesa de fabrico e comércio de tintas e vernizes, criada em 1917, cuja sede está situada na Maia. Em 1992, a CIN torna-se líder no setor em Portugal, sendo que em 1995 se revela líder na Península Ibérica. É constituída por 10 unidades de produção, em Portugal, Espanha, Angola e Moçambique. É importante realçar que a empresa conta com mais de 1800 colaboradores e 150 técnicos de I&D. Através do I&D, a CIN introduz no mercado produtos inovadores, que garantem que as necessidades são cumpridas, aumentando significativamente o volume de negócios.

A empresa dedica-se às áreas de negócios que abrangem as tintas e os vernizes, sendo que 53% destes são relativos à construção civil, 34% à indústria e 13% à proteção anticorrosiva. No setor da construção civil, as tintas e vernizes são aplicados com o intuito de decorar e proteger a superfície. Relativamente ao setor da proteção anticorrosiva, são exigidas tintas e vernizes de alto desempenho para a proteção de estruturas metálicas ou de betão, de modo a torná-las resistentes a agentes corrosivos, como ambiente marítimo, químico e urbano. Quanto à indústria, são utilizadas tintas e vernizes líquidos ou em pó para a aplicação em instalações industriais. É de realçar que as tintas em pó são comercializadas sob a marca MEGADUR, sendo produzidas numa unidade fabril situada no Castelo da Maia [1].

A missão da empresa em causa passa por:

- Fornecer as melhores soluções com a melhor equipa do mercado de tintas e vernizes;
- Satisfazer as necessidades dos clientes e liderar o mercado em que intervém, em que se compromete à excelência no fornecimento de produtos e serviços inovadores e de qualidade.
- Crescer em quota de mercado e rentabilidade, alcançando a satisfação dos clientes e melhorando continuamente o conhecimento e eficiência dos processos de negócio.
- Conduzir o negócio com integridade, respeitando a lei e o ambiente [2].

A CIN é certificada pela norma ISO 9001:2015, referente aos sistemas de gestão da qualidade, pela norma ISO 14001:2015, que compreende o sistema de gestão ambiental e ainda pela norma OHSAS 18001, que abrange sistemas de gestão de higiene e

segurança no trabalho. Assim, esta tripla certificação garante que a sua política cumpre todos os requisitos normalizados.

1.4. Melhoria Contínua

Visando a procura da melhoria contínua, a CIN Industrial Coatings, em 2018, implementou nas suas unidades fabris a filosofia *Lean Thinking*, com o auxílio do *Kaizen Institute*.

O *Lean Thinking* defende que se deve produzir apenas o que é necessário, na quantidade necessária e no momento certo, de forma a diminuir os custos e os tempos de entrega, aumentando a qualidade [3].

A palavra *Kaizen* significa “mudança para melhor” (*Kai* – mudança; *zen* - para melhor) em japonês, pelo que surge então o conceito de melhoria contínua. A melhoria contínua caracteriza-se pela insatisfação constante e conseqüente procura de melhores resultados, o que assegurará ao cliente um produto ou serviço com qualidade superior. A melhoria contínua é uma das principais estratégias para a excelência na produção, pelo que é considerado vital no ambiente empresarial [4].

De seguida serão abordados os princípios *Lean* bem como ferramentas utilizadas para promover a melhoria contínua.

1.4.1. Princípios *Lean*

O Sistema Toyota de Produção (TPS) antecede o pensamento *Lean* (“magro”) e tinha como principal intuito aumentar a eficiência de produção pela identificação, seguida da eliminação contínua dos desperdícios detetados, pelo que se devem reunir esforços para eliminar os 3 M (muda (desperdício), mura (variabilidade), e muri (sobrecargas)) [3].

Posteriormente, surge o conceito *Lean*, que procura cumprir os mesmos objetivos que o TPS, tendo como objetivo desenvolver processos que criem valor, reduzindo continuamente os desperdícios ao longo de todo o processo de produção [3].

Deste modo, a filosofia *Lean Thinking* baseia-se em 5 princípios fundamentais, nomeadamente:

- Definir os valores – o valor é tudo aquilo que o cliente está disposto a pagar, ou seja, o valor é definido pelo cliente final;

- Definir as cadeias de valor – a organização tem que definir para cada parte interessada a respetiva cadeia de valor, pelo que a empresa deverá procurar um equilíbrio de interesses; é importante definir as atividades que criam valor, as que não criam valor, mas que são indispensáveis e as que não criam valor e não são necessárias, sendo que podem ser eliminadas;
- Otimizar o fluxo – é necessário procurar interligar os meios na criação de valor para todas as partes, isto é, os materiais, as pessoas, a informação e o capital, com o intuito de reduzir qualquer desperdício;
- Implementar o sistema *Pull* – este sistema procura deixar o cliente liderar os processos, ou seja, elimina fabricos efetuados com base em previsões da procura;
- Procurar a perfeição – ter em vista sempre a melhoria contínua, de modo a dar ao cliente algo mais próximo daquilo que ele pretende [3].

1.4.2. Ferramentas *Kaizen*

A melhoria contínua é promovida através da colaboração de todos numa organização, sendo que existem ferramentas determinadas para esse efeito.

Uma ferramenta de extrema importância é o *Kaizen* Diário, que faz parte de um modelo de transformação organizacional conhecido como “*Kaizen Management System*” [5].

O principal intuito do *Kaizen* Diário é mudar as mentalidades da organização, e consequentemente, facilitar a implementação de melhorias, bem como melhorar a comunicação de topo com todas as equipas da unidade fabril. Para tal, é necessário o contributo de todos, caso contrário, pode originar um recuo nas mudanças ocorridas.

Este método abrange 4 níveis evolutivos:

- Nível 1: consiste na organização da equipa, em que são realizadas reuniões diárias por parte das equipas, sendo destacados aspetos importantes, como a identificação de desperdícios e dos indicadores de progresso, principalmente perceber o que correu mal no dia anterior e como melhorar e congratular o que correu bem.
- Nível 2: corresponde à organização do posto de trabalho, com o auxílio da ferramenta dos 5S.

- Nível 3: consiste na implementação da normalização através de ferramentas como ciclo PDCA e auditorias.
- Nível 4: a resolução estruturada de problemas pelas equipas baseadas na aplicação de métodos como A3, 5 *Whys*, *Kobetsu* ou 3C.

É importante referir que, no decorrer do processo, as equipas adquirem autonomia para manter e melhorar diariamente os seus processos [6].

Uma das ferramentas mais implementada no nível 2 do *Kaizen* Diário são os 5S, que correspondem a uma metodologia que procura reduzir o desperdício e otimizar a produtividade através de uma organização adequada dos postos de trabalho, com auxílio de sinais visuais.

Este método designa-se por 5S, uma vez que é composto por 5 palavras japonesas, que constituem as 5 etapas do mesmo:

- *Seiri* (Triagem) – consiste na determinação rigorosa de tudo o que se encontra no local de trabalho, de modo a eliminar o que não é necessário para a execução do trabalho;
- *Seitan* (Arrumação) – o principal intuito desta etapa é que todo o material apresente um local definido para se encontrar devidamente arrumado e, portanto, permitir que a atividade seja efetuada em fluxo contínuo;
- *Seiso* (Limpeza) – etapa crucial para manter o local de trabalho limpo, pelo que são estipulados procedimentos de limpeza diários para garantir esta melhoria;
- *Seiketsu* (Normalização) – corresponde ao passo que define regras de trabalho, de modo a que o operário obtenha conhecimento de como deve proceder;
- *Shitsuke* (Autodisciplina) – é importante criar hábitos dos aspetos estabelecidos nas outras etapas, podendo ser auxiliados por auditorias, que promovem o envolvimento de todos os colaboradores, motivando-os à procura da melhoria contínua em conjunto [3].

A melhoria contínua também pode ser implementada com o auxílio da gestão visual, que consiste numa metodologia que utiliza informações visuais no *gemba*, isto é, no local de trabalho, de modo a evitar a ocorrência de erros e desperdícios de tempo. Este método transmite aos operadores o que fazer, quando fazer e quais as situações de inconformidade, através de sinais, símbolos, gráficos, cores ou pictogramas [3].

É, portanto, uma ferramenta que identifica instantaneamente a discrepância entre a situação ideal e a real, permite identificar oportunidades de melhoria e incentiva os colaboradores a implementar diariamente a gestão visual, dado que se revela um mecanismo de fácil compreensão de todos [7].

Relativamente ao nível 3 do *Kaizen* Diário, a ferramenta mais relevante é o ciclo PDCA, que é um meio através do qual se pode atingir a melhoria contínua, pelo que também é conhecido por ciclo de melhoria contínua. Este método revela-se simples, sendo que não é necessário nenhum conhecimento de uma determinada tecnologia para o implementar. Na Figura 1.1 encontra-se representado o ciclo PDCA que de seguida será explicado detalhadamente [8].

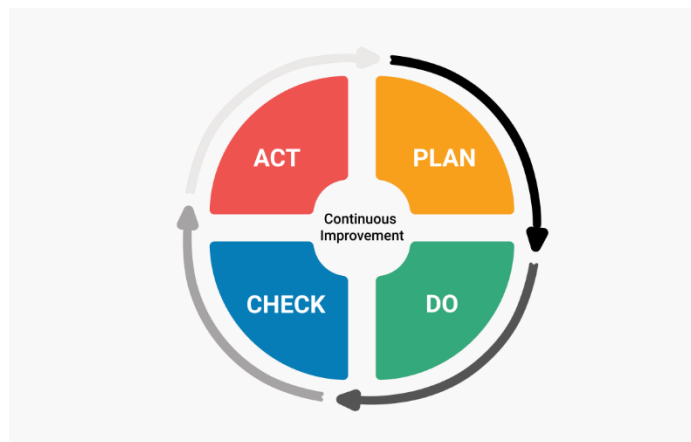


Figura 1.1 Ilustração do Ciclo PDCA [8].

O ciclo está dividido em 4 partes:

- Planear (*Plan*) – consiste em definir uma hipótese sobre os resultados, em que são estabelecidas metas para controlar determinados aspetos, bem como o caminho que se deve seguir para alcançar os objetivos definidos;
- Fazer (*Do*) – relativo à implementação do plano, de modo a recolher todos os dados;
- Verificar (*Check*) – referente ao estudo dos resultados obtidos, comparando-os com os resultados esperados, pelo que é necessário tentar perceber o que correu melhor ou pior;
- Agir (*Act*) – corresponde à etapa em que se reflete o conhecimento adquirido, sendo que se a hipótese inicial se verificar, pode-se criar um padrão que possa ser auditado e mantido; caso contrário, estabelecer novos objetivos e recomeçar o ciclo PDCA [3].

É importante ter em conta que este ciclo é focado nos processos, respeitando sempre as pessoas, prevalecendo a humildade e o bom senso entre equipa [3], [9].

Atualmente, várias organizações utilizam o método DMAIC, isto é, *Define* (definir), *Measure* (medir), *Analyse* (analisar), *improve* (melhorar) e *Control* (controlar), que corresponde a uma ferramenta de resolução estruturada de problemas.

Esta metodologia compreende as seguintes etapas, ilustradas na Figura 1.2:

- Definir – a primeira fase compreende a definição do problema, sendo que este é definido como uma questão ou uma situação que exige uma solução.
- Medir – a etapa seguinte consiste em medir o desempenho do processo, em que se estabelece a linha de base atual como base para a melhoria.
- Analisar – esta fase permite determinar as causas raiz de cada problema, permitindo a identificação de como atingir o estipulado.
- Melhorar – nesta etapa pretende-se melhorar o desempenho do processo, propondo, avaliando e implementando soluções para cada problema identificado.
- Controlar – o último passo desta metodologia consiste em definir o plano de ação a ser implementado, de modo a garantir que o processo se encontra sob controlo [10].

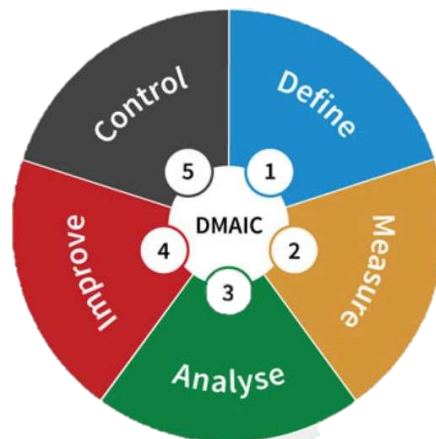


Figura 1.2 Ilustração das etapas do método DMAIC [11].

Quanto ao nível 4 do Kaizen Diário, podem ser utilizadas ferramentas como 3C, A3, 5 Whys ou Kobetsu.

A metodologia 3C (Caso, Causa e Contramedida) é uma ferramenta que permite identificar a causa da raiz dos problemas, de modo a evitar a sua recorrência, que compreende os passos apresentados na Figura 1.3.

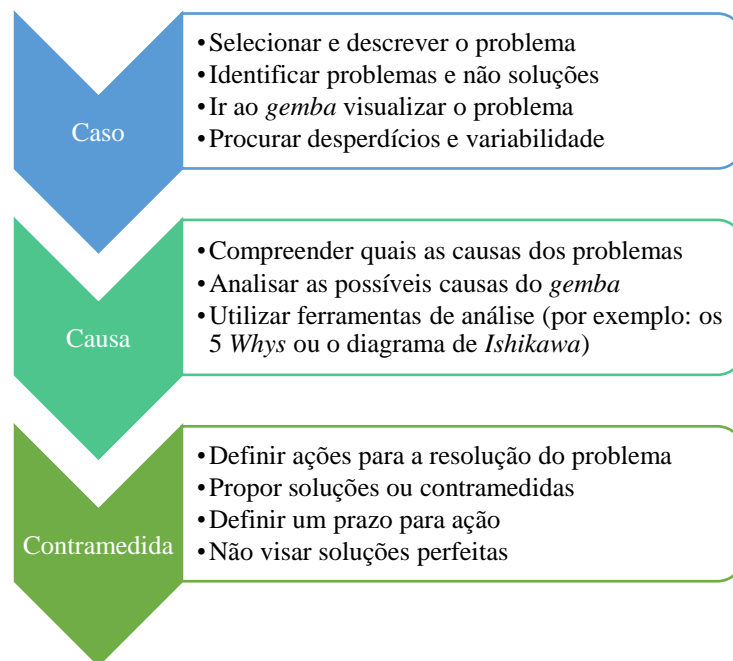


Figura 1.3 Passos da metodologia 3C. [Adaptado de [12]]

Posteriormente, procede-se à verificação, analisando os dados e verificando se estes estão de acordo com o que era expectável [12].

No que concerne à ferramenta A3, esta permite a resolução de problemas relativamente complexos, sendo que esta está diretamente relacionada com o ciclo PDCA. Pode ser implementado com o intuito de resolver problemas, planejar questões específicas ou para tomar uma decisão. É constituída por 7 passos: clarificação do problema, situação atual, definição dos objetivos, análise da causa raiz, contramedidas, implementação e confirmação do efeito [13].

Também a análise 5 *Whys* (“5 porquês”) constitui uma ferramenta crucial para a determinação da causa-raiz de um determinado problema. No Sistema de produção Toyota acredita-se que perguntando 5 vezes porquê se obtém a causa-raiz. É de salientar que através deste método podem surgir múltiplas causas, sendo necessário definir prioridades e intervir na causa que mais impacto tem no problema em questão [3]. A análise é efetuada de acordo com o procedimento presente na Figura 1.4.

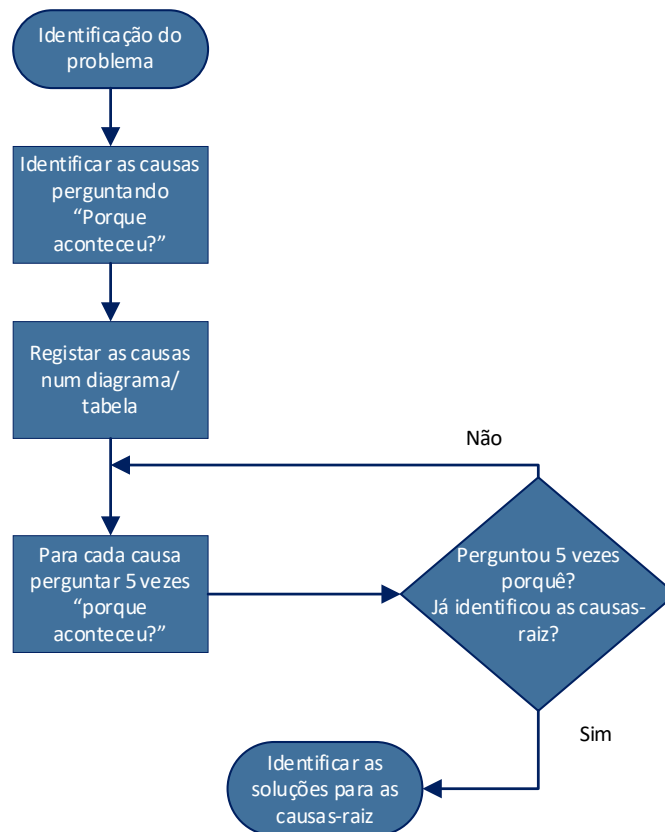


Figura 1.4 Fluxograma do procedimento da análise 5W. [Adaptado de[3]]

A ferramenta *Kobetsu* visa aumentar a eficiência do equipamento (OEE), através de uma abordagem estruturada, cujo objetivo é eliminar as avarias. É uma metodologia que pretende também desenvolver competências de resolução de problemas para identificar e eliminar de modo eficaz as causas-raiz [14].

A *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) corresponde a um indicador que avalia o desempenho operacional dos equipamentos através da equação 1.1 que abrange a disponibilidade e a performance do equipamento e a qualidade dos produtos resultantes [15].

$$OEE (\%) = Performance \times Disponibilidade \times Qualidade \times 100 \quad (1.1)$$

Este parâmetro está diretamente relacionado com o índice de produtividade de uma empresa, sendo este dependente dos tempos programados de produção e de paragem de produção da mesma linha, bem como do tempo total da produção e da quantidade de produto em conformidade [15].

O parâmetro performance consiste na razão entre a quantidade de produto produzido em relação ao que teoricamente deveria ter sido produzido, tendo em conta a perda

de velocidade do equipamento e as micro-paragens, isto é, paragens menores que 5 min [16].

Quanto ao fator disponibilidade, este define-se como a razão entre o tempo de produção e o tempo programado, considerando-se as perdas de disponibilidade, ou seja, *set ups* e paragens não programadas [16].

Relativamente ao fator qualidade, este corresponde ao quociente entre o número de produtos em conformidade com determinadas especificações e o número de produtos produzidos no total.

2. Introdução teórica

Neste capítulo será realizada uma exposição sobre as tintas em pó, a sua constituição, o processo de fabrico deste tipo de revestimento, o controlo de qualidade realizado e serão também abordadas algumas técnicas de aplicação dos mesmos.

2.1. Tintas em pó

Um dos sistemas industriais mais usados para a proteção de um substrato de metal são as tintas em pó, uma vez que estas conferem propriedades excelentes ao substrato, dependendo do tipo de resina utilizado.

O uso de tintas em pó como processos de acabamento tem aumentado significativamente nos últimos anos, devido às suas vantagens nomeadamente:

- possuem elevada resistência química e mecânica;
- não utilizam solventes;
- o baixo risco de incêndio, uma vez que não contêm compostos inflamáveis;
- a possibilidade da aplicação de camadas mais espessas, na mesma aplicação;
- o reaproveitamento do pó, que pode ser até 98%.

Contudo, este tipo de revestimento apresenta algumas desvantagens associadas, como a troca de cor mais demorada entre processos; difícil aplicação de camadas mais finas, dado que pode surgir o efeito casca de laranja; difícil aplicação em substratos não metálicos e em substratos com geometrias complexas [17].

2.2. Composição das tintas em pó

Este revestimento é constituído por resinas poliméricas, pigmentos, endurecedores, cargas e aditivos.

2.2.1. Resinas

As resinas são o principal constituinte das tintas em pó, pelo que determinam as propriedades do revestimento. As tintas em pó podem ser termoplásticas ou termoendurecíveis, consoante a natureza química da resina impregnada na sua formulação.

As tintas em pó termoplásticas apresentam normalmente maior e elevado peso molecular que as termoendurecíveis, pelo que o filme da tinta é formado após a fusão da resina. Este processo é físico, sendo que não ocorre reação química, e reversível, uma vez que, quando novamente sujeito à ação de calor o filme de tinta volta a fundir. Estes tipos

de filme apresentam, frequentemente, maior espessura e a sua aplicação é realizada através do leito fluidizado para fins não decorativos e de proteção [18].

Relativamente às tintas termoendurecíveis, que são as produzidas na CIN, após o processo de polimerização com o endurecedor, formam uma estrutura complexa de elevado peso molecular. Contrariamente às termoplásticas, o processo é irreversível, dado que não é possível fundir novamente quando é submetido ao calor. Este tipo de revestimentos é aplicado por via eletrostática, pelo que torna possível a formação de um filme com menor espessura, que são utilizados para fins decorativos e de proteção [18].

As resinas termoendurecíveis podem ser poliéster, epóxi, híbrido (epóxi e poliéster), acrílico e poliuretano.

A resina epóxi é geralmente obtida através da reação de epícloridrina e bisfenol A, como é possível verificar pela Figura 2.1[18].

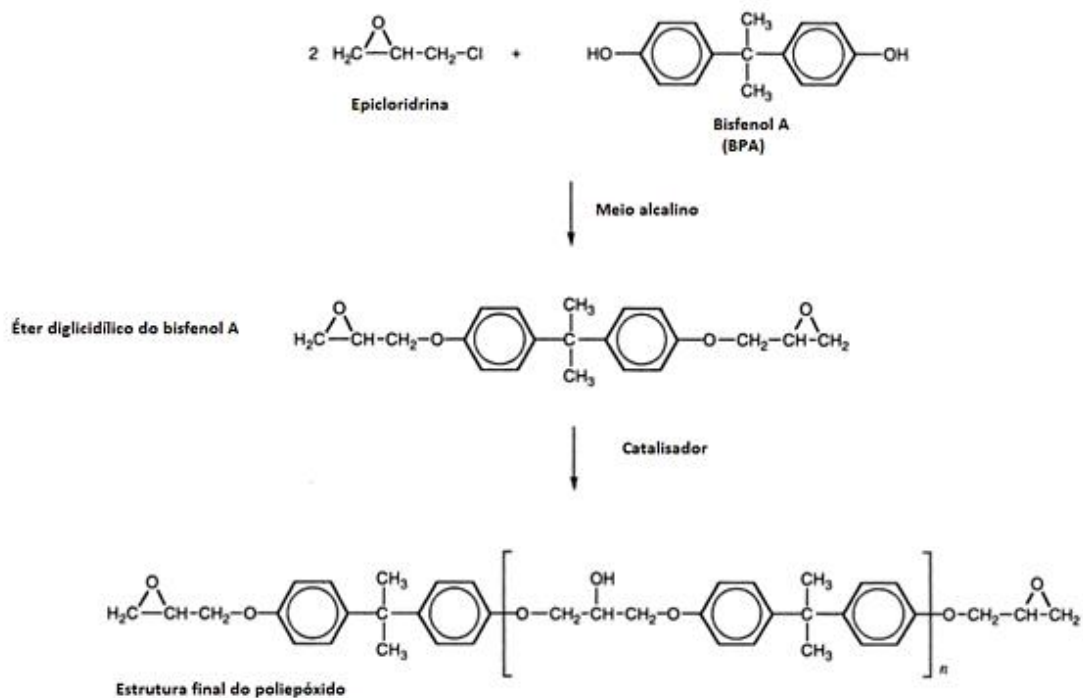


Figura 2.1 Estrutura química da resina epóxi obtida através da reação de epícloridrica e bisfenol A [18].

A resina epóxi apresenta alta densidade, o que promove ótimas propriedades de aderência, dureza e resistência química. Contudo, a presença de núcleos aromáticos na sua estrutura origina a fraca estabilidade à luz e ao calor, isto é, a uma maior facilidade de decomposição térmica, pelo que estas resinas se destinam essencialmente para proteção à corrosão, para uso interno ou áreas de pouca exposição à luz ultravioleta [19]. Por

isso, são comumente utilizadas como isoladores internos para alternadores de automóveis, em tubagens de gás e petróleo, extintores de incêndio, fornos, ferramentas de jardim, equipamentos hospitalares, estojos de instrumentos, móveis de cozinha, batedeiras e liquidificadores, prateleiras, brinquedos, entre outros [20].

Relativamente às resinas poliéster, estas são resultantes da reação entre poliácidos e poliálcoois, influenciando diretamente na flexibilidade do filme de tinta formado. A sua estrutura química encontra-se representada na Figura 2.2 [21].



Figura 2.2 Estrutura química do poliéster resultante de esterificação direta de poliácidos com poliálcoois. (Adaptado de [21])

Estas resinas são estáveis na presença de calor e de luz, resistentes à meteorização natural, ao amarelecimento e à ação conjugada da humidade e radiação UV [19]. Posto isto, é expectável que as tintas de poliéster sejam aplicadas para proteção de substratos expostos à luz solar, por exemplo, em componentes de automóveis, móveis de jardim e utensílios agrícolas.

No que concerne às tintas em pó híbridas, estas dependem do teor de cada resina incluída na sua formulação. A relação 50:50 de poliéster e epóxi origina um revestimento com elevada resistência química e à água em ebulição, no entanto, não se revela resistente a intempéries. Quanto às tintas compostas por resinas híbridas, com 70% de poliéster e 30% de epóxi, estas apresentam melhor resistência à meteorização e ao amarelecimento, contudo, têm menor resistência química [19]. Deste modo, estas resinas híbridas permitem obter um revestimento intermediário entre o epóxi e o poliéster, conjugando as vantagens e os inconvenientes das mesmas. Este tipo de tintas é projetado para utilizar em produtos de interior, pelo que devem ser consideradas principalmente para uso decorativo. Estas são aplicadas tipicamente em filtros de ar, equipamento de informática, extintores de incêndio, aquecedores de água quente, filtros de óleo, ferramentas elétricas, *primers*, prateleiras e caixas de ferramentas [20].

2.2.2. Pigmentos

Os pigmentos são substâncias insolúveis, que conferem cor, opacidade e resistência à corrosão. A estabilidade da cor em relação aos raios UV e ao calor pode ser influenciada significativamente devido à qualidade dos pigmentos. É de realçar que se os pigmentos das tintas líquidas de base solvente forem inertes quimicamente e resistentes ao calor, estes podem também ser impregnes nas tintas em pó [22].

2.2.3. Endurecedores

Os endurecedores, também denominados por agentes de cura ou reticulantes, quando reagem com a resina, determinam o tipo de estrutura polimérica formada, o grau de ligações cruzadas e a resistência mecânica e química do material [18].

2.2.4. Cargas

As cargas são responsáveis por regular a dureza e a resistência química do produto final. As cargas são substâncias inorgânicas de baixo custo, pelo que a sua utilização pode ser vantajosa, desde que as propriedades finais do produto sejam asseguradas [22].

2.2.5. Aditivos

Os aditivos são substâncias utilizadas em quantidades pequenas, que modificam o aspeto final do filme, sendo que pretendem ainda melhorar as características físico-químicas da tinta. Existem vários tipos de aditivos, como catalisadores, de desgasificação, agentes mateantes e agentes texturantes, pelo que se distinguem consoante o tipo de propriedade que se pretende alcançar.

Os aditivos catalisadores são utilizados quando se pretende aumentar a velocidade da reação de cura, sendo que o objetivo é reduzir o tempo de cura a uma determinada temperatura. Relativamente aos aditivos de desgasificação, estes são utilizados com o intuito de diminuir a quantidade de defeitos na superfície da tinta, causados pela libertação de gases ou humidade de substratos, como o aço galvanizado e o ferro fundido [23]. Quanto aos agentes mateantes, estes permitem ajustar o brilho dos produtos. Os agentes texturantes correspondem a aditivos inertes, isto é, não afetam significativamente a cor e as propriedades físicas do pó, conferindo textura aos acabamentos [22].

2.4. Processo de fabrico

O processo de fabrico das tintas em pó baseia-se nas seguintes etapas: a pesagem, a pré-mistura, a extrusão, a micronização e o enchimento, que serão explicadas detalhadamente. O processo produtivo encontra-se representado na Figura 2.3 [21].

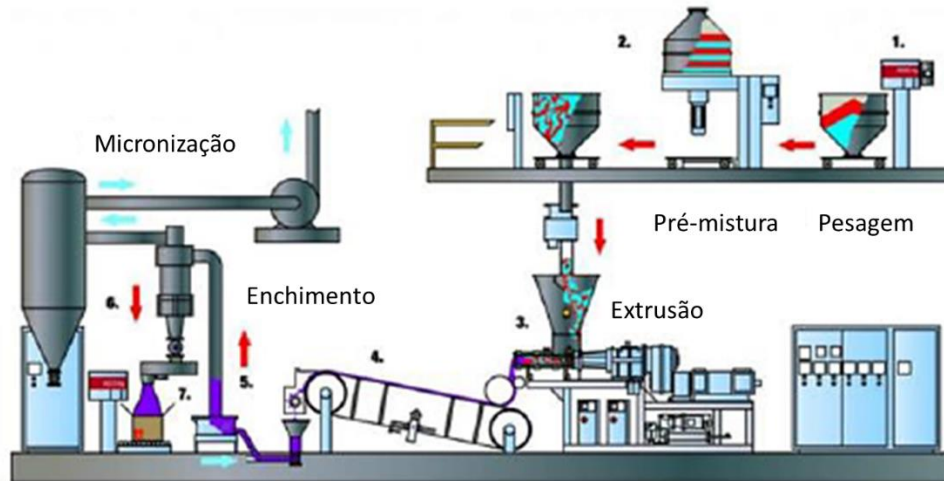


Figura 2.3 Esquema representativo do processo de fabrico das tintas em pó. (Adaptado de[21]).

No esquema da Figura 2.3 está representado uma fábrica moderna para a produção de tintas em pó, isto é, em processo contínuo. É importante referir que a primeira etapa é efetuada de forma descontínua, pelo que as seguintes ocorrem de forma contínua.

O processo inicia-se pela pesagem dos componentes das tintas em pó separadamente, em balanças destinadas a esse fim, que são misturados no pré-misturador. Nesta etapa é importante ter em conta fatores como a qualidade e as quantidades das matérias-primas incorporadas na mistura [22].

A pré-mistura constitui a etapa mais importante do processo de fabrico de tintas em pó, uma vez que desempenha um papel decisivo na determinação da qualidade do produto final. De salientar que uma pré-mistura deficiente, principalmente de substâncias em menores quantidades, por exemplo de aditivos e pigmentos, não pode ser corrigida nas etapas seguintes. Uma má pré-mistura pode resultar numa composição heterogénea da tinta, em más propriedades mecânicas, cor não uniforme da superfície do substrato, brilho reduzido e defeitos de superfície [21].

Na pré-mistura deve-se ter em conta primeiramente, a ordem de introdução das matérias-primas no tanque, mas também o tempo e a velocidade de mistura em cada pré-misturador [22].

Após a pré-mistura, os componentes são direcionados para a extrusora, no qual ocorrem transformações físicas relevantes da mistura. Assim, a pré-mistura é inserida num doseador de alimentação, que regula o caudal da extrusora contínua e regularmente. De seguida, a mistura passa por um fuso com velocidade constante. No interior da extrusora dá-se a fusão dos componentes, através da energia fornecida pelo equipamento, bem como a energia gerada através do atrito existente entre a pasta viscosa e as paredes internas da extrusora. É importante referir que a temperatura também tem um papel fulcral na etapa de extrusão, uma vez que a mistura deve ser extrudida a uma temperatura que evite reações entre componentes, dado que pode originar tintas com fraca capacidade de fluir, como também baixa adesão do pó ao substrato [21].

O material resultante do processo de extrusão é prensado entre dois rolos arrefecidos com água, induzindo um choque térmico no mesmo, seguindo-se para um tapete rolante arrefecido, de modo a torná-lo num material quebrável. À saída do tapete, encontra-se um triturador, que, com o impacto, converte o filme de produto em pequenas pastilhas [21].

Assim, na etapa da extrusão são parâmetros de extrema importância os seguintes:

- Caudal de alimentação;
- Temperaturas do fuso, do produto e da banda de arrefecimento;
- Velocidade do veio [22].

De seguida, as pastilhas resultantes da extrusora são novamente reduzidas a pó nos moinhos através do impacto da superfície dos mesmos, ocorrendo então a micronização. Nesta etapa pretende-se reduzir as partículas de pó até que atinjam dimensões entre 10 e 100 μm [24]. As partículas mais finas são eliminadas utilizando um ciclone. Constatou-se, então, que na micronização se deve ter em atenção o caudal e a temperatura do ar, o caudal de alimentação de pastilha, a velocidade do separador e a quantidade de pó micronizado [22].

Por fim, ocorre o enchimento, em que primeiramente acontece a classificação das partículas, através de peneiros rotativos e vibratórios, sendo que a tinta que atravessa o peneiro está apta para ser embalada diretamente. De salientar que o produto sobredimensionado é recirculado de volta ao moinho [21]. Pode-se ainda incluir na composição das tintas um agente de facilitação de escoamento, o agente *free flow*, que evita que haja tendência à aglomeração de partículas durante o armazenamento das tintas em pó.

2.5. Controlo de qualidade das tintas em pó

De modo a garantir que os produtos produzidos não apresentam nenhuma não conformidade é realizado o controlo de qualidade dos produtos, no Laboratório de Controlo de Qualidade (LCQ), em que se realizam alguns dos testes enumerados na Figura 2.4.

Cor	Aspeto Película	Brilho
Aderência	Índice de fluidez	Flexibilidade Mandril
Granulometria	Resistência ao Choque	Resistência à riscagem

Figura 2.4 Testes realizados no controlo de qualidade em tintas de pó.

De seguida serão explicados parâmetros como a cor, a espessura do revestimento e o brilho, uma vez que apresentam maior relevância no decorrer do projeto.

2.5.1. Cor

A cor é um aspeto muito importante nas tintas em pó, pelo que a sua determinação se baseia na comparação da cor da amostra com a cor de referência, em condições específicas de iluminação e visualização [21].

De modo a tornar a cor dos produtos universal, é utilizado o sistema RAL, que consiste numa tabela constituída por um conjunto de tonalidades definidas, cujo intuito é padronizar a descrição das cores no mundo da indústria. Na Figura 2.5 encontra-se um exemplo de uma carta de cores do sistema RAL [25].



Figura 2.5 Carta de cores do sistema RAL [25].

2.5.2. Espessura do revestimento

A determinação da espessura do revestimento corresponde a um processo essencial para garantir a qualidade do produto acabado. É importante ter em conta a espessura, uma vez que esta varia consoante o fim a que se destina, sendo que pode influenciar a aparência, o desempenho da peça e até mesmo a sua longevidade.

A espessura do revestimento é determinada depois da cura. Tipicamente, esta determinação utiliza equipamentos que se baseiam na indução magnética, estando estes projetados para serem utilizados em materiais de base magnetizáveis, como é o caso do aço ou do ferro, com revestimentos não magnéticos, por exemplo, as tintas. É uma medição não destrutiva, que fornece dados precisos sem comprometer a integridade do produto final [26]. Na Figura 2.6 encontra-se um exemplo de um medidor de espessura de revestimentos [27].



Figura 2.6 Medidor de espessura de tinta [27].

2.5.3. Brilho

O brilho é definido na norma ISO 2813:2014 como uma propriedade ótica de uma superfície, caracterizada pela sua capacidade de refletir a luz especularmente. Este pode ser influenciado pela espessura do filme do revestimento, a quantidade de carga, o tamanho e a forma da partícula de pó e pela distribuição do tamanho das partículas [28].

Geralmente é determinado através de medidores de brilho, que através de uma fonte de luz, que fornece um feixe incidente para a superfície da amostra, e de um recetor da luz refletida, conseguem determinar o valor do brilho. As medições podem ser efetuadas a 3 ângulos diferentes de medição:

- a 20°- recomendado para medições de materiais com brilho elevado, acima de 70 UB (Unidades de Brilho), pelo que este ângulo apresenta maior sensibilidade à neblina, que afeta a aparência de uma superfície;
- 60°- é o ângulo mais utilizado, sendo considerado padrão universal, pode ser empregue em medições com baixo, médio ou alto brilho;
- e 85°- comumente utilizado para realizar medições de superfícies com baixo brilho, isto é, abaixo de 10 UB, sendo também aplicado para medir o brilho de superfícies com textura ou ligeiramente irregulares [29].

Na Figura 2.7 está representada uma determinação do brilho com o equipamento adequado [30].



Figura 2.7 Determinação do brilho através de um medidor de brilho [30].

O brilho de uma superfície é dependente do comportamento refletivo da mesma, isto é, se a refletância é especular ou difusa, como está representado na Figura 2.8 [31].

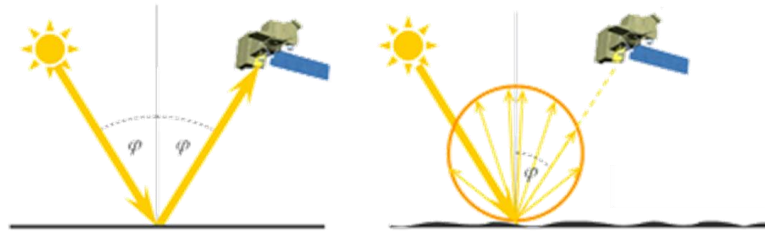


Figura 2.8 Representação da refletância especular (à esquerda) e difusa (à direita)[31].

A refletância especular caracteriza-se pelo facto de o ângulo de reflexão ser igual ao ângulo de incidência. Contrariamente, a refletância difusa é resultante da luz da superfície ser refletida em vários ângulos, devido à rugosidade da superfície [32].

É expectável que produtos texturados apresentem um comportamento de refletância difusa, uma vez que o agente de textura provoca uma ligeira rugosidade da superfície do substrato.

2.6. Técnicas de aplicação

Este tipo de revestimentos pode ser aplicado por aplicação eletrostática, aplicação triboelétrica e processo de leito fluidizado.

A pulverização eletrostática é o processo mais utilizado na aplicação de tintas em pó num metal. Este método baseia-se na propulsão do pó seco através do ar comprimido, com o auxílio de uma pistola (Corona) eletricamente carregada, sendo que o movimento das partículas entre a pistola e o substrato, em que o pó será aplicado, ocorre devido à combinação de forças elétricas e mecânicas. As forças elétricas são provenientes das

interações entre as partículas de pó carregadas e o campo elétrico, enquanto que as forças mecânicas são resultado do ar que transporta o pó através da pistola. É crucial que o substrato se encontre ligado à terra. Desta forma, as partículas de pó retêm a carga elétrica, aderindo ao substrato. De salientar que quando o campo elétrico é removido, as partículas de pó permanecem na superfície do substrato, devido à atração pelas cargas opostas presentes no substrato [21]. Na Figura 2.9 consta um esquema representativo do processo de aplicação eletrostática com pistola (Corona) [21].

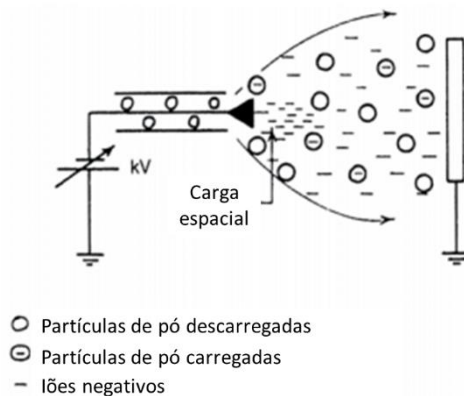


Figura 2.9 Esquema representativo do processo de aplicação eletrostática com pistola (Corona). (Adaptado de[21])

Relativamente à aplicação triboelétrica, esta está relacionada com o carregamento eletrostático das partículas de pó através do seu atrito ao corpo inteiro da pistola, que é composto por materiais com potencial elétrico adequado para provocar este efeito. A pistola triboelétrica é constituída, geralmente, por um tubo de Teflon, pelo qual a tinta em pó é impulsionada através do ar comprimido, provocando um fluxo turbulento no interior da pistola. É de realçar que as paredes do tubo são aterradas, de modo que a carga gerada nas paredes seja dirigida permanentemente para a terra. Comparativamente à pistola Corona, na pistola triboelétrica existe um campo elétrico muito fraco, criado entre o substrato e a nuvem de pó carregada, o que torna possível revestir objetos com formatos de difícil acesso, por exemplo, de forma convexa e com cavidades [21]. Na Figura 2.10 está representado o funcionamento de uma pistola triboelétrica [33].

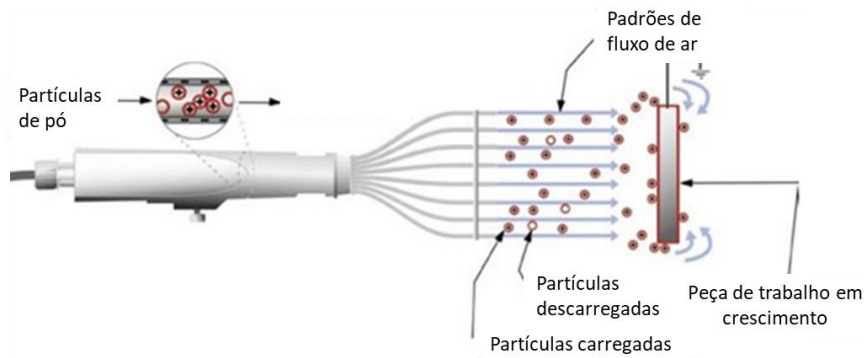


Figura 2.10 Esquema representativo do funcionamento de uma pistola triboelétrica. (Adaptado de [33])

No que concerne ao processo de leito fluidizado, este consiste em colocar o substrato pré-aquecido, a uma temperatura superior à temperatura de fusão do pó a ser aplicado, no espaço em que, através do ar as partículas de pó são mantidas num leito fluidizado. As partículas de pó ao entrarem em contacto com a superfície do substrato pré-aquecido fundem e aderem à mesma. É de salientar que na etapa seguinte existe um aquecimento adicional, de modo a ocorrer o processo de cura [21].

Existem fatores que influenciam o processo de leito fluidizado, nomeadamente, a temperatura, a capacidade térmica do substrato e o seu tempo de residência no leito fluidizado, pelo que dependendo destes podem ser aplicadas várias camadas de revestimento a uma peça de trabalho. Assim, é uma técnica que apresenta como vantagens o facto de cobrir defeitos de superfície, o custo de investimento reduzido e os custos de operação baixos, contudo, obter películas com espessuras uniformes revela-se uma grande dificuldade para este tipo de aplicação [24], [34]. Na Figura 2.11 encontra-se representado o esquema representativo da aplicação de tintas em pó através do processo de leito fluidizado.

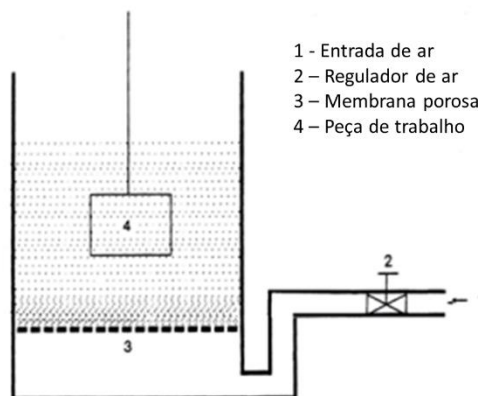


Figura 2.11 Esquema representativo da aplicação através do processo de leito fluidizado. (Adaptado de [21])

3. DMAIC

Neste capítulo encontra-se descrita a metodologia utilizada para a resolução do problema existente, ou seja, o método DMAIC, cuja sigla significa *Define* (definir), *Measure* (medir), *Analyse* (analisar), *Improve* (melhorar) e *Control* (controlar).

3.1. *Define*

A primeira etapa do método DMAIC, como referido anteriormente no subcapítulo 1.4.2, corresponde à definição do problema, sendo que este passa pela falta de reprodutibilidade no valor do brilho entre a Aprovação de Pré-Mistura (APM) em produtos texturados e epóxi-poliésteres satinados lisos.

É importante referir que o alvo do projeto é o brilho e que cada produto apresenta valores limites estipulados, de acordo com o definido pelo I&D e com o que é pedido pelo cliente. Quando se verifica que o valor do brilho se encontra não concordante com os limites impostos, conclui-se que o produto está em não conformidade e, portanto, deve ser corrigido ou rejeitado.

3.1.1. Aprovação de Pré-Mistura

É importante referir que a APM corresponde a uma etapa criada pela própria empresa, com o intuito de aprovar a pré-mistura, uma vez que apenas é possível modificar a formulação antes da pré-mistura entrar na extrusora, porque após passar por esta, a formulação não pode ser alterada, apenas podem ser efetuados pequenos ajustes, na micronização.

A APM consiste na aprovação da pré-mistura, sendo que é passada uma amostra representativa do fabrico numa extrusora à escala laboratorial. De seguida, a pastilha obtida na mesma é submetida a um controlo de qualidade prévio, com o intuito de se verificar se existe reprodutibilidade na APM e na extrusora de produção. De salientar que na APM, existem duas extrusoras, uma para os tons claros e outra para os tons escuros, o que facilita muito o processo de limpeza e ajuda a evitar contaminações. A principal diferença que se verifica entre as duas máquinas é no fuso, como se pode averiguar pela Figura 3.1.



Figura 3.1 Fuso da extrusora dos tons escuros (à esquerda) e dos tons claros (à direita).

Com a etapa de APM, é possível evitar que existam paragens na linha de produção, para eventuais correções e, portanto, contribui para aumentar a OEE da empresa, uma vez que não tem que comprometer a produtividade da mesma.

Para uma melhor compreensão do processo produtivo incluindo a fase de APM, foi elaborado um fluxograma do mesmo, apresentado na Figura 3.2.

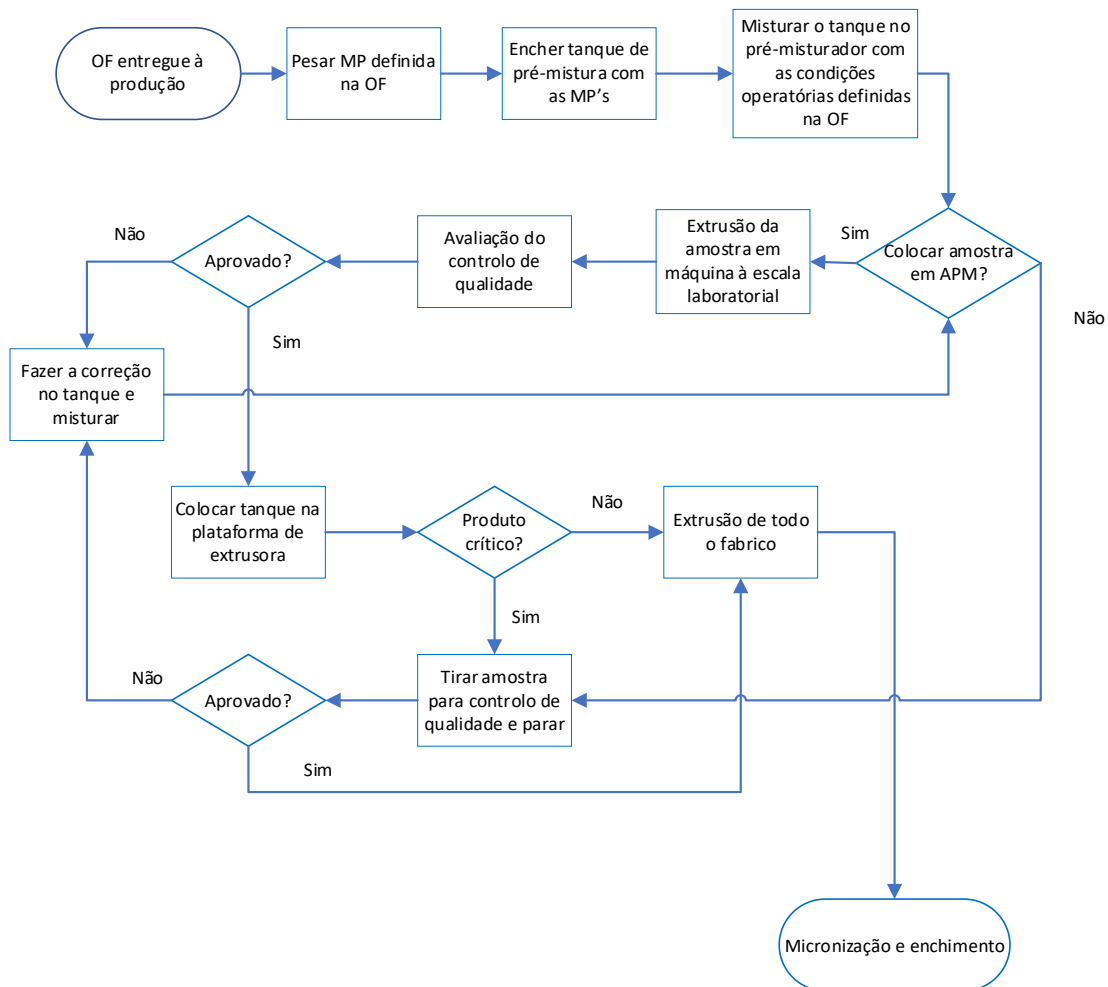


Figura 3.2 Fluxograma do processo produtivo incluindo APM em que OF significa ordem de fabrico e MP matéria-prima.

Deste modo, na empresa em causa apurou-se que a OEE se revelava inferior ao esperado, nas linhas 2 e 6, onde são produzidos os produtos texturados. Isto verifica-se devido ao facto destes produtos apresentarem a obrigatoriedade de paragem para efeitos de controlo de qualidade, pois apresentam um historial de diferenças significativas entre APM e a produção. Também os produtos epóxi-poliéster satinados obrigam à paragem, contudo estes são produzidos em todas as linhas.

Assim, nasce a necessidade da criação de um indicador por parte da empresa, de modo a quantificar o número de vezes que a produção não para, denominado por *Non Stop Yield* (NSY). Este indicador é calculado de acordo com a equação 3.1.

$$NSY (\%) = \frac{\text{Número de produtos que não param durante a produção}}{\text{Número de produtos finalizados}} \times 100 \quad (3.1)$$

Posto isto, é perceptível que os produtos críticos, mencionados ao longo da presente dissertação, originem uma menor percentagem de NSY.

Na Figura 3.3 e na Figura 3.4 estão representados graficamente os registos das paragens na extrusora, para cada linha de produção, devido aos produtos críticos em estudo, os epóxi-poliésteres satinados e os texturados, e ainda devido a outros motivos, como mencionado anteriormente. Está também representado o indicador NSY para cada linha nos diferentes anos.

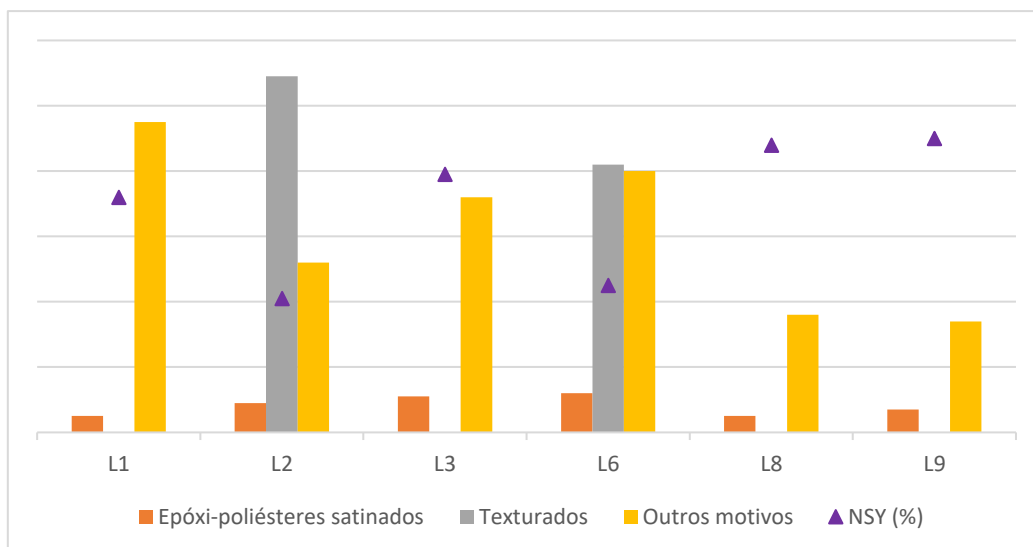


Figura 3.3 Registos das paragens na extrusora, devido à produção de epóxi-poliésteres satinados, texturados e outros motivos, e o indicador NSY, representados por linha, em 2020.

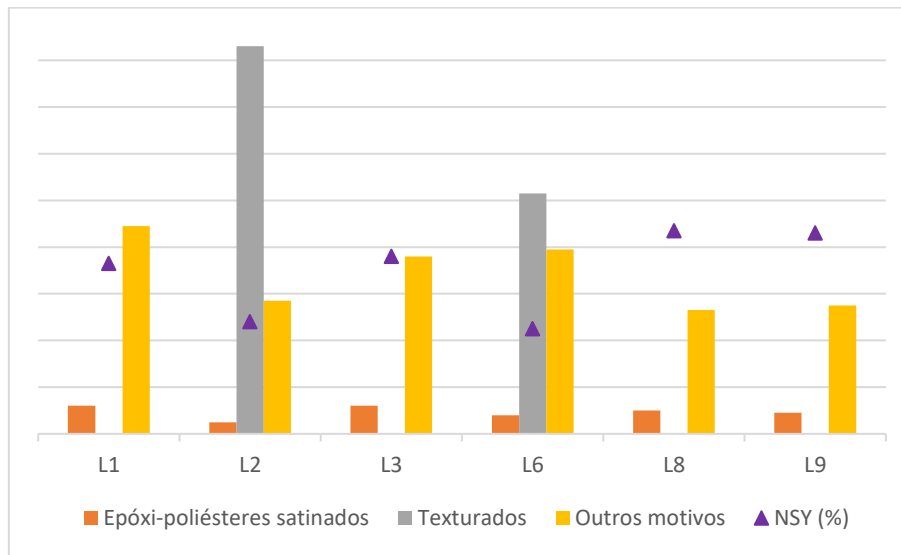


Figura 3.4 Registos das paragens na extrusora, devido à produção de epóxi-poliésteres satinados, texturados e outros motivos, e o indicador NSY, representados por linha, em 2021.

Como se pode averiguar pela observação dos gráficos da Figura 3.3 e da Figura 3.4, nas linhas 2 e 6 há maior destaque para a produção de produtos texturados e, por isso, é onde se obtêm valores mais baixos para o indicador NSY.

Assim, é expectável que se forem eliminadas as paragens obrigatórias na produção dos mesmos, a percentagem de NSY aumente e, conseqüentemente, o valor da OEE, uma vez que o fator disponibilidade também aumenta, dado que o tempo para produzir aumenta e o tempo de paragem diminui. Na Figura 3.5 encontra-se representado graficamente o valor do indicador NSY global dos anos de 2020 e 2021, bem como a percentagem de NSY que era expectável se se eliminassem as paragens obrigatórias nos produtos críticos em estudo.

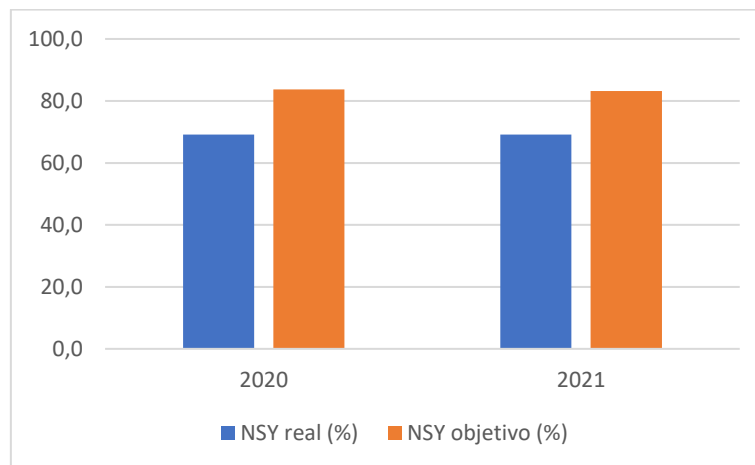


Figura 3.5 Registo do indicador NSY global dos anos de 2020 e de 2021, e respetivos valores objetivos.

3.1.2. Desenho de Experiências

Com o intuito de determinar as condições ótimas de reprodutibilidade entre a APM e a produção foi traçado um desenho de experiências.

O desenho de experiências (DoE) corresponde a uma ferramenta estatística utilizada na análise dos problemas de qualidade e da melhoria contínua do processo de produção. Esta metodologia permite determinar quais são os fatores controláveis que influenciam dadas características da qualidade, bem como os melhores níveis desses fatores, com o intuito de aumentar a resistência do produto à variabilidade [35].

O foco deste projeto são produtos epóxi-poliéster satinados e os produtos texturados, que abrangem produtos epóxi-poliéster texturados e poliéster texturados. Assim, ao longo da presente dissertação os produtos A, B e C correspondem a epóxi-poliésteres satinados lisos, os produtos D, E, F, G e H a epóxi-poliésteres texturados e os produtos I, J e K a poliésteres texturados. É fulcral ter em conta que as amostras dos produtos utilizados para o projeto foram retiradas consoante o que estava a ser produzido em fábrica, o que limita o estudo.

Antes de passar para o DoE, foi necessário determinar se alguns fatores tinham influência, nomeadamente, a localização de onde é extraída a amostra, a influência das extrusões serem efetuadas de forma sequencial e a temperatura da pasta à saída da extrusora.

Para se analisar a influência da localização de onde é extraída a amostra retiraram-se 3 amostras de 3 locais diferentes do tanque, como se encontra representado na Figura 3.6, em 3 tanques diferentes, de modo a existir 3 réplicas.

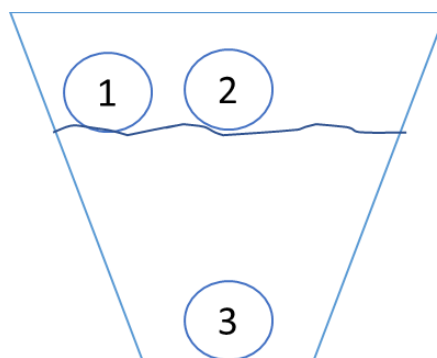


Figura 3.6 Representação das localizações da amostra no tanque.

É de notar que este estudo foi efetuado num produto epóxi-poliéster texturado, e os resultados encontram-se representados no gráfico da Figura 3.7.

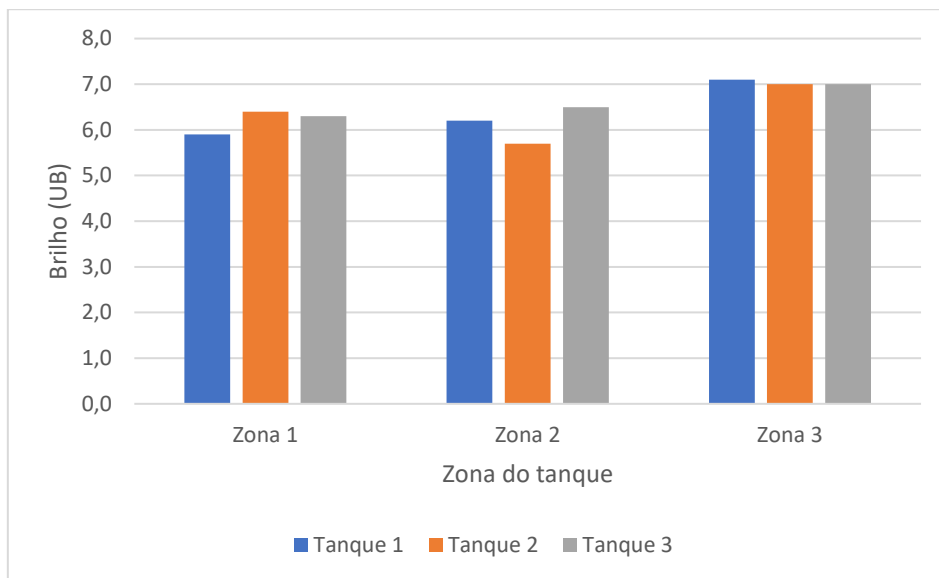


Figura 3.7 Representação gráfica do valor do brilho obtido nas amostras de diferentes zonas do tanque.

Através da observação da Figura 3.7, percebe-se que não existe uma tendência entre as diferentes zonas de onde são extraídas as amostras. Deste modo, não foi contabilizada a variação do local de extração da amostra para o estudo.

De seguida, foi efetuado um estudo relativamente ao procedimento de APM, para ser possível compreender se tem influência realizar todas as extrusões em APM seguidas, sem incluir limpeza. Este estudo foi efetuado com um produto poliéster texturado. Para isso, realizaram-se 5 extrusões seguidas, 5 extrusões com limpeza entre as mesmas e ainda 5 extrusões com limpeza, mas efetuadas de hora em hora. A média dos brilhos destes ensaios encontra-se representada na Figura 3.8.

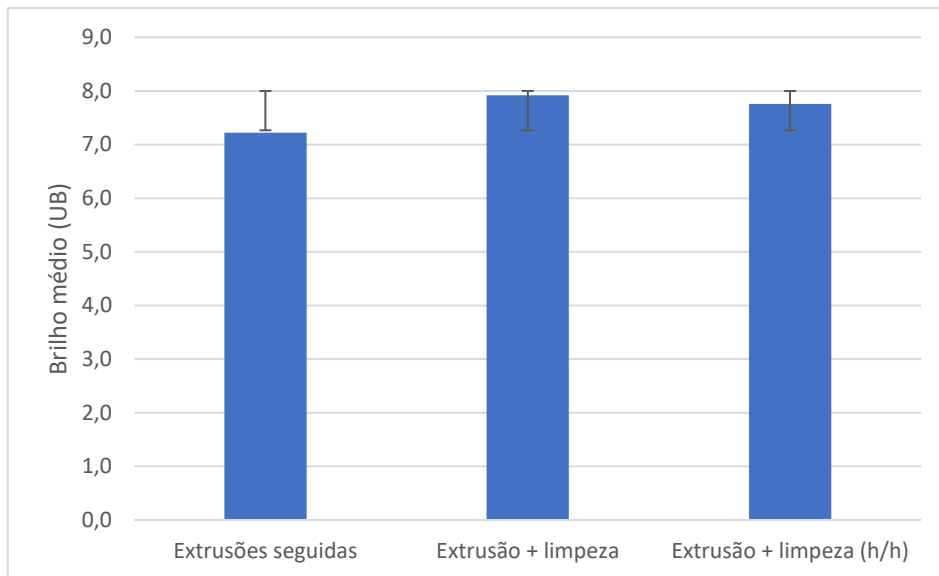


Figura 3.8 Representação gráfica do valor médio do brilho obtido e respetivo desvio-padrão, para as 5 extrusões seguidas, para as extrusões com limpeza posterior e para as extrusões com limpeza realizadas de hora em hora.

Tendo em conta a Figura 3.8, concluiu-se que não existe uma tendência relativamente ao modo como são efetuadas as extrusões. Considerou-se então que só se justificava fazer a limpeza quando se utilizava um produto diferente.

Ao longo destes últimos ensaios descritos registou-se também a temperatura da pasta à saída, com o intuito de se averiguar se a temperatura permanecia constante. Os resultados desta experiência estão presentes na Figura 3.9.

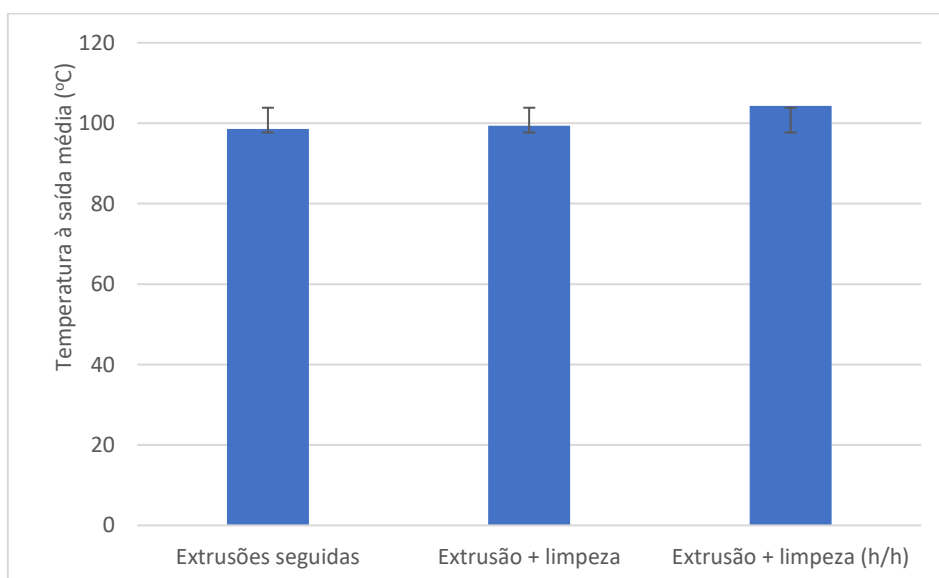


Figura 3.9 Representação gráfica do valor médio da temperatura da pasta registada para as 5 extrusões seguidas, para as extrusões com limpeza posterior e para as extrusões com limpeza realizadas de hora em hora.

Considerando a Figura 3.9, é perceptível que a temperatura se mantém constante para os diferentes procedimentos.

Foi ainda efetuado um estudo no caudal de alimentação das duas extrusoras de APM, uma vez que inicialmente se verificavam grandes diferenças de brilho entre extrusões realizadas nas mesmas condições operatórias nos dois equipamentos. Para tal traçaram-se curvas de calibração tendo em conta o valor do equipamento e a massa do produto debitado num minuto.

Deste modo, considerando que os fatores estudados anteriormente não têm influência significativa, procedeu-se ao desenho de experiências.

Inicialmente, definiram-se três fatores controláveis que influenciam a extrusora da APM, que serão denominados por fator X, Y e Z ¹ ao longo da dissertação. Estipularam-se três níveis para o fator X, de 70, 90 e 120 e dois níveis para o fator Y, de 150 e 250. Relativamente ao fator Z, não foi possível extrair dados suficientes fazendo variar o mesmo, uma vez que inicialmente a máquina revelava problemas, dando-se ênfase aos fatores X e Y.

A ferramenta utilizada para o projeto foi o *Minitab*, que corresponde a um software estatístico utilizado nas empresas que procurem melhorar os processos continuamente.

Assim, com o auxílio desta ferramenta foi traçado um desenho de experiências tendo em conta os fatores considerados e que cada ensaio base tem 3 réplicas, sendo no total 18 ensaios resultantes das combinações 70.150.2,3, 70.250.2,3, 90.150.2,3, 90.250.2,3, 120.150.2,3 e 120.150.2,3.

As condições standard de operação das extrusoras de APM são 90.250.2,3, exceto para a linha 3 em que as mesmas são 120.150.2,3, devido a um estudo elaborado anteriormente.

3.2. *Measure*

A segunda fase do ciclo DMAIC corresponde à fase *Measure*, sendo que nesta é definido como é possível resolver o problema. Neste subcapítulo está presente o método utilizado para a obtenção dos valores de brilho a considerar [36].

¹ Os nomes dos fatores não são exibidos por motivos de confidencialidade.

3.2.1. Método

Numa fase inicial, foram retirados 40 kg de pré-mistura para um saco grande que depois não permitiu a homogeneização da pré-mistura aquando da extrusão em APM, pelo que após se verificar isto, se optou por fazer a separação da pré-mistura para sacos mais pequenos, de modo a ser possível a sua homogeneização.

A pré-mistura foi extrudada nas diferentes condições previamente estipuladas. Após a extrusão, a pasta originária, representada na Figura 3.10, é submetida a uns rolos arrefecidos com água fria, de modo a criar um choque térmico e a torne frágil, com o intuito de a converter em pastilha, como se encontra na Figura 3.11.

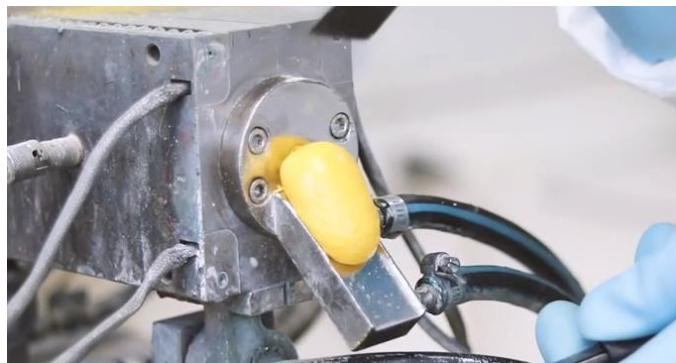


Figura 3.10 Pasta originária do processo de extrusão.



Figura 3.11 Pastilha obtida após arrefecimento nos rolos.

Após se obter a pastilha, a amostra é encaminhada para o LCQ, onde é micronizada com um moinho à escala laboratorial. O pó obtido é peneirado com o auxílio de peneiros, para se dar a separação das partículas de maiores dimensões. É de realçar que

para cada produto está estipulada a rede adequada para o efeito. Posto isto, dá-se o peneiramento do pó micronizado durante um determinado tempo, obtendo-se a tinta em pó pronta a utilizar.

De salientar que a aplicação da tinta em pó dos ensaios em causa foi por aplicação eletrostática por pistola, em chapas de metal ligadas à Terra, visto que é um dos critérios para que o pó se ligue à chapa. Com o intuito de evitar contaminações no momento da aplicação, no LCQ existem cabines de extração destinadas a produtos de tons claros (uma para lisos e outra para texturados e granulados) e a produtos de tons escuros (também uma para lisos e outra para texturados e granulados).

Posteriormente, as chapas são submetidas à ação do calor em estufas calibradas para o efeito, para que seja possível ocorrer a reação de cura, sendo que para cada produto está tabelado o tempo ideal que o produto tem que permanecer na estufa. Após as chapas arrefecerem, é importante medir de imediato o brilho, com o auxílio do medidor de brilho, bem como a respetiva espessura. De notar que o valor do brilho considerado corresponde à média de três pontos distintos na chapa, para garantir que o valor é homogéneo ao longo de toda a superfície.

É necessário garantir que a espessura da camada de tinta aplicada seja superior a 75 μm e inferior a 90 μm , pois poderá ter influência no brilho dos produtos texturados. Quanto aos produtos satinados, as espessuras não são um fator de influência no valor do brilho.

A metodologia descrita anteriormente foi aplicada para os produtos selecionados para o estudo. Todos estes produtos são críticos, pelo que obrigam a paragem da produção para controlo do brilho. De salientar que o processo de extrusão, micronização, aplicação e avaliação efetuado para cada ensaio considerado dura, aproximadamente, uma hora.

3.3. *Analyse*

A terceira etapa do método DMAIC corresponde ao *Analyse*, pelo que esta abrange a identificação das fontes de variação e a análise da variância dos resultados obtidos.

3.3.1. Diagrama de Ishikawa

É crucial perceber as causas que podem estar a influenciar a falta de reprodutibilidade entre APM e a produção, pelo que se recorreu ao Diagrama de Ishikawa. O

Diagrama de Ishikawa, também conhecido por Diagrama Causa e Efeito ou por Diagrama Espinha de Peixe, é uma ferramenta da qualidade que permite identificar os possíveis fatores que desencadeiam o efeito, isto é, o problema a ser resolvido. Frequentemente, é construído através da agrupação das causas em 6M, ou seja, Método, Mão de obra, Medida, Material, Meio ambiente e Máquina. Assim, é exequível a identificação da causa-raiz, de modo a eliminá-la e, conseqüentemente, eliminar o efeito da mesma [37].

Assim, analisando toda a envolvente da APM, através de um *brainstorming* foi possível construir um Diagrama de Ishikawa, com causas possíveis para o problema em questão, como se pode averiguar pela Figura 3.12.

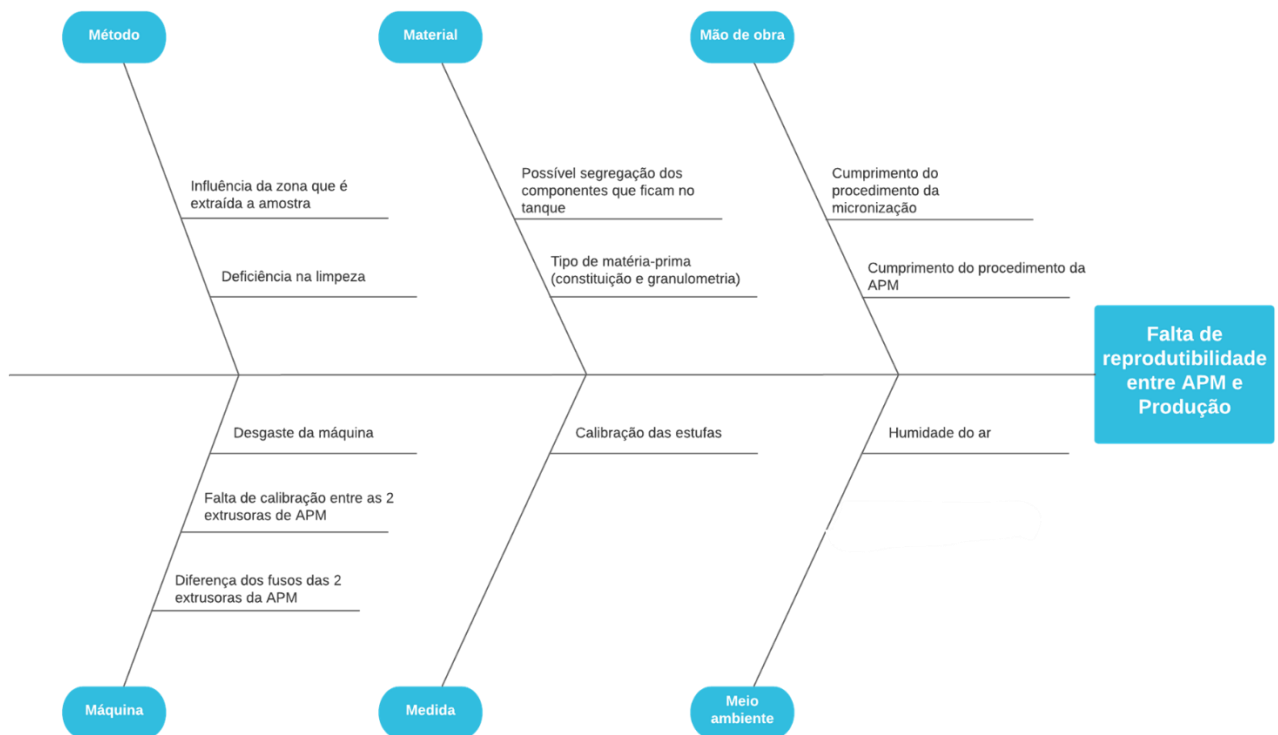


Figura 3.12 Diagrama de Ishikawa para a falta de reprodutibilidade entre a APM e a produção.

Analisando a Figura 3.12, percebe-se que a falta de reprodutibilidade entre a APM e a produção pode ter diversas causas relativas ao próprio equipamento, nomeadamente, o facto de existir desgaste do mesmo, por exemplo, dos pinos e dos elementos que constituem a extrusora, ou diferenças entre as duas extrusoras da APM, ou ainda devido à falta de calibração da alimentação das duas extrusoras.

Relativamente ao método, a deficiência na limpeza pode gerar contaminações e afetar o valor do brilho, bem como a zona onde é extraída a amostra que também pode influenciar o mesmo.

As causas do problema em análise associadas ao material passam pela possível segregação dos componentes que ficam no tanque como também pelo tipo de matérias-primas utilizadas, por exemplo, que fazem parte da formulação dos texturados, no caso, o politetrafluoretileno (PTFE).

No que concerne à mão de obra, é colocado em causa o cumprimento dos procedimentos da APM, uma vez que pode acontecer de não se obedecer ao tempo de estabilização da máquina e influenciar os resultados; e o da micronização, uma vez que se se exceder o tempo de micronização pode originar brilhos superiores (à escala laboratorial).

Quanto à medição, as estufas devem-se encontrar devidamente calibradas, para se assegurar que a única reação existente ocorre, de modo a não interferir no resultado.

Por fim, o meio ambiente também pode condicionar o processo, nomeadamente, a humidade do ar.

3.3.2. ANOVA

A análise de variância, comumente denominada por ANOVA, permite estudar a variação existente nos resultados dos ensaios realizados, e o teste de significância estatística, em que é determinado o valor-p da estatística F que obedece à distribuição F de Snedecor. De salientar que todos os testes efetuados foram através da ferramenta *Minitab*. Deste modo, é possível comparar o valor-p obtido com o nível de significância (α), geralmente, de 0,05, que significa que se considerou um nível de confiança de 95%. Quando se comparam os dois valores mencionados tem-se em conta a hipótese nula (H_0), em que se considera que todas as médias são iguais, e a hipótese alternativa (H_1), que considera que nem todas as médias são iguais.

Contudo, para ser possível aplicar a ANOVA é necessário garantir que alguns pressupostos se verificam, nomeadamente, a homocedasticidade ou a homogeneidade das variâncias, a independência dos dados e a normalidade dos mesmos [38].

Primeiramente, recorreu-se ao teste da normalidade dos resíduos, de modo a averiguar se este pressuposto é garantido e se se pode validar a ANOVA.

Para testar a normalidade recorreu-se ao teste de Anderson-Darling, visto que este revela ser um método mais eficaz na deteção de desvios nas caudas de distribuição [39]. Este teste abrange as hipóteses H_0 e H_1 , pelo que a primeira considera que os dados

seguem uma distribuição normal e a segunda que os dados não seguem uma distribuição normal.

Comparando o valor-p resultante do teste de hipóteses com o nível de significância de 0,05, percebe-se se é possível rejeitar ou não a hipótese nula, pelo que se o valor-p for superior a 0,05 conclui-se que não se pode rejeitar H_0 , e, portanto, não se pode concluir que os dados não seguem uma distribuição normal. Quanto menor for o valor-p, mais forte será a evidência contra a hipótese nula.

Posteriormente, efetuou-se o teste de igualdade de variâncias, considerando-se H_0 a hipótese que todas as variâncias são iguais e H_1 a hipótese que, no mínimo, uma variância é diferente.

Através do valor-p obtido para o teste de igualdade de variâncias comparou-se com o nível de significância de 0,05, pelo que se o valor-p for superior a 0,05 conclui-se que não se pode rejeitar H_0 e, portanto, não se rejeita a hipótese de que existe homogeneidade das variâncias.

Tabela 3.1 Valores obtidos no teste de normalidade dos resíduos (respostas dos testes presentes nos Figuras A.1, B.1, C.1, D.1, E.1, F.1, G.1, H.1, I.1, J.1 e K.1) e no teste de igualdade das variâncias (Figuras A.2, B.2, C.2, D.2, E.2, F.2, G.2, H.2, I.2, J.2 e K.2), para cada produto.

Produto	Valor-p	
	Normalidade dos resíduos	Homogeneidade das variâncias
A	0,482	0,966
B	0,570	0,684
C	0,174	0,326
D	0,186	0,410
E	0,397	0,532
F	0,035	0,820
G	0,041	0,508
H	0,125	0,055
I	0,404	0,649
J	0,771	0,595
K	0,517	0,391

Como é perceptível pela

Tabela 3.1, apenas os valores dos produtos F e G não seguem uma distribuição normal, uma vez que o valor-p correspondente é inferior a 0,05. Assim, o teste de igualdade de variâncias aplicado nestes dois produtos foi o teste de Levene, visto que se verificou que os dados não seguem uma distribuição normal. Quanto a todos os outros produtos, em que se aferiu que os dados seguiam uma distribuição normal, utilizou-se o teste de Bartlett para o estudo da homogeneidade das variâncias. Analisando o valor-p obtido através do teste mencionado, de cada produto, constata-se que todos são superiores a 0,05, pelo que se pode afirmar que não se pode rejeitar a hipótese de que todas as variâncias são iguais.

Para os produtos que não foram verificados os pressupostos da ANOVA, F e G, recorreu-se ao teste de Kruskal-Wallis, que é um teste de hipóteses que permite determinar se as medianas de dois ou mais grupos diferem entre si [40]. Este teste abrange as hipóteses H_0 e H_1 , que consideram que todas as medianas são iguais e que, no mínimo, uma mediana é diferente, respetivamente.

Assim, tendo em conta os valores obtidos para as diferentes combinações do produto F, presente na Tabela F. 1, e do produto G, que consta na Tabela G. 1, executou-se o teste de Kruskal-Wallis. O valor-p obtido para o produto F foi de 0,047 (Figura F. 3) e para o produto G de 0,010 (Figura G. 3), sendo que se pode concluir que ambos os produtos rejeitam a hipótese nula e, portanto, existe pelo menos uma mediana diferente entre as diferentes combinações.

Relativamente a todos os outros produtos que se validaram os pressupostos da ANOVA, aplicou-se a ANOVA para 1 fator, uma vez que esta análise é indicada para se verificar se uma resposta contínua, neste caso o brilho, apresenta diferenças entre as médias de dois ou mais grupos [41]. O fator considerado na análise corresponde à combinação dos fatores X, Y e Z, estando estes representados por FatorX.FatorY.FatorZ. Incluiu-se o valor obtido na extrusora da produção, para ser comparável com os valores das diferentes combinações.

Na Tabela 3.2 estão presentes os valores obtidos para o valor-p no teste da ANOVA com um fator para cada produto.

Tabela 3.2 Valores obtidos para o valor-p no teste da ANOVA com um fator para cada produto (respostas dos testes presentes nas Figuras A.3, B.3, C.3, D.3, E.3, F.3, G.3, H.3, I.3, J.3 e K.3).

Produto	ANOVA com um fator
	Valor-p
A	0,004
B	0,005
C	0,004
D	0,002
E	0,338
H	0,057
I	0,041
J	0,174
K	0,026

Analisando a Tabela 3.2, conclui-se que todos os produtos cujos valor-p são inferiores a 0,05, rejeitam a hipótese de que todas as médias dos grupos são iguais, pelo que existem diferenças consideradas significativas do ponto de vista estatístico. Isto verifica-se nos produtos A, B, C, D, I e K, sendo que os restantes não apresentam diferenças significativas.

Com o objetivo de complementar esta análise, executou-se o teste de Tukey que permite realizar comparações múltiplas, isto é, torna possível a comparação entre todos os grupos de valores, neste caso, entre as várias combinações de fatores.

De notar que a análise das respostas do teste de Tukey será apresentada individualmente, para cada produto, uma vez que embora sejam produtos da mesma família de resinas, possuem aditivos e cargas diferentes, não sendo comparáveis entre si. Com o intuito de existir maior perceção da variabilidade dos dados recorreu-se a gráficos *boxplot*.

Produto A

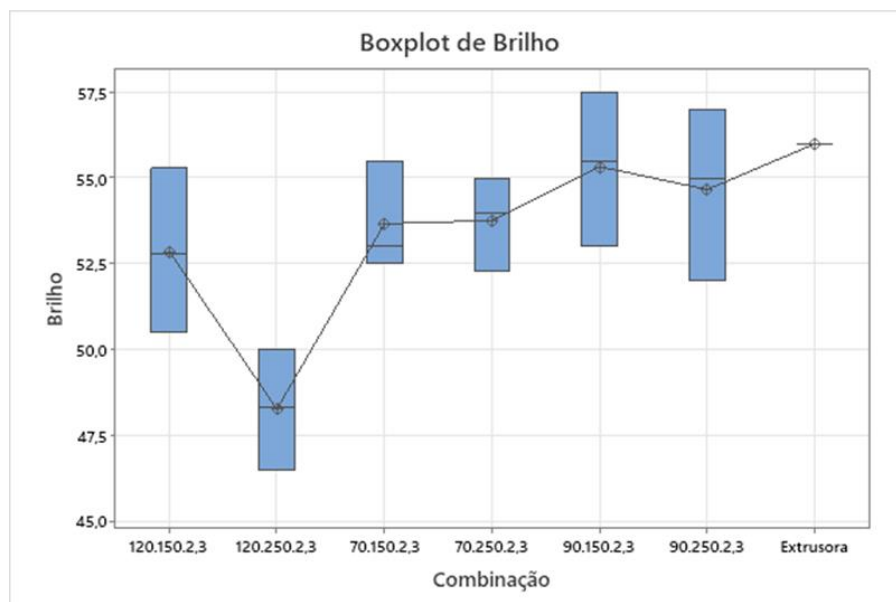
O produto A corresponde a um epóxi-poliéster satinado liso claro, sendo que o valor obtido na extrusora de produção foi de 56 UB e os limites estipulados na empresa são de 55 a 61 UB. Em APM obteve-se o valor de 54 UB, pelo que se existisse confiança na aprovação deste produto, e se se considerasse apenas o valor de APM o mesmo teria sido corrigido. Contudo, como é perceptível, na produção o valor encontra-se em

conformidade com o intervalo permitido, porque existe diferença entre a aceitação da APM e da produção, pelo que se revela um produto crítico.

Tendo em conta os valores obtidos para as diferentes combinações do produto A, apresentados na Tabela A. 1, efetuou-se o teste de Tukey, utilizando o programa Minitab (Figura 3.13 (a)).

Combinação	Média	Agrupamento
Extrusora	56,0	A
90.150.2,3	55,3	A
90.250.2,3	54,7	A
70.250.2,3	53,8	A
70.150.2,3	53,7	A
120.150.2,3	52,9	A B
120.250.2,3	48,3	B

(a)



(b)

Figura 3.13 Teste de Tukey (a) e gráfico boxplot de acordo com as diferentes combinações (b), para o produto A.

Produto B

O produto B é também um epóxi-poliéster satinado liso claro, produzido na linha 3, e, portanto, as condições de operação em APM são as da combinação 120.150.2,3. O valor obtido em APM foi de 54 UB e na produção de 57 UB. Os limites de brilho impostos pela empresa são de 51 a 57 UB.

Com os dados da Tabela B. 1 executou-se o teste de Tukey, pelo que o seu resultado se encontra representado na Figura 3.14 (a).

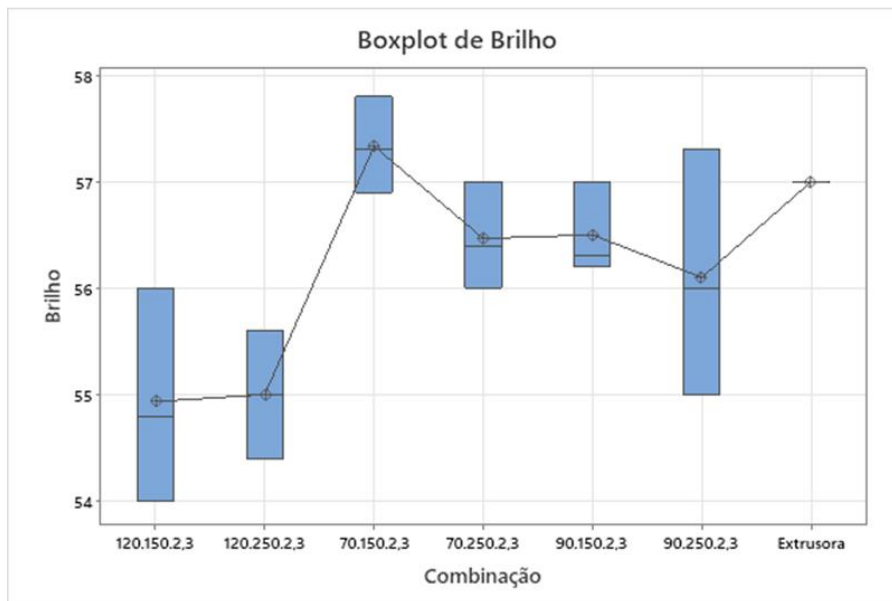
Através da visualização da Figura 3.14 (a) compreende-se que todas as combinações respeitam os limites admitidos (51 - 57 UB), contudo não partilham todos o mesmo grupo. O grupo que inclui o valor da extrusora, grupo A, não partilha grupo com as combinações cujo fator X é de 120, pelo que se conclui que existem diferenças estatisticamente significativas entre os mesmos, isto é, entre o valor da extrusora e as condições utilizadas em APM (equivalentes à combinação 120.150.2,3).

O gráfico *boxplot* para o produto B está representado na Figura 3.14 (b). Na Figura 3.14 (b), verifica-se que a combinação 90.250.2,3 apesar de partilhar grupo com a combinação extrusora, apresenta uma grande variabilidade associada aos dados obtidos, sendo que a previsibilidade será menor. Na combinação 120.150.2,3, também apresenta uma grande variabilidade nos valores obtidos, sendo que esta combinação é comparativa às condições de APM, como mencionado anteriormente.

As combinações que apresentam mais proximidade com o valor da produção é a 70.150.2,3 e a 90.150.2,3, visto que ambas partilham o mesmo grupo, letra A, com a extrusora e ainda pelo facto das *boxplots* serem mais achatadas, o que revela menor variabilidade.

Combinação	Média	Agrupamento
70.150.2,3	57,3	A
Extrusora	57,0	A
90.150.2,3	56,5	A B
70.250.2,3	56,5	A B
90.250.2,3	56,1	A B
120.250.2,3	55,0	B
120.150.2,3	54,9	B

(a)



(b)

Figura 3.14 Teste de Tukey (a) e gráfico boxplot de acordo com as diferentes combinações (b), para o produto B.

Produto C

O produto C é outro epóxi-poliéster satinado liso claro, também produzido pela linha 3 e, conseqüentemente, em APM as condições operatórias são idênticas à combinação 120.150.2,3. O valor obtido em produção foi de 67 UB, em APM de 65 UB e o intervalo de valores de brilho considerado é de 64 a 70 UB.

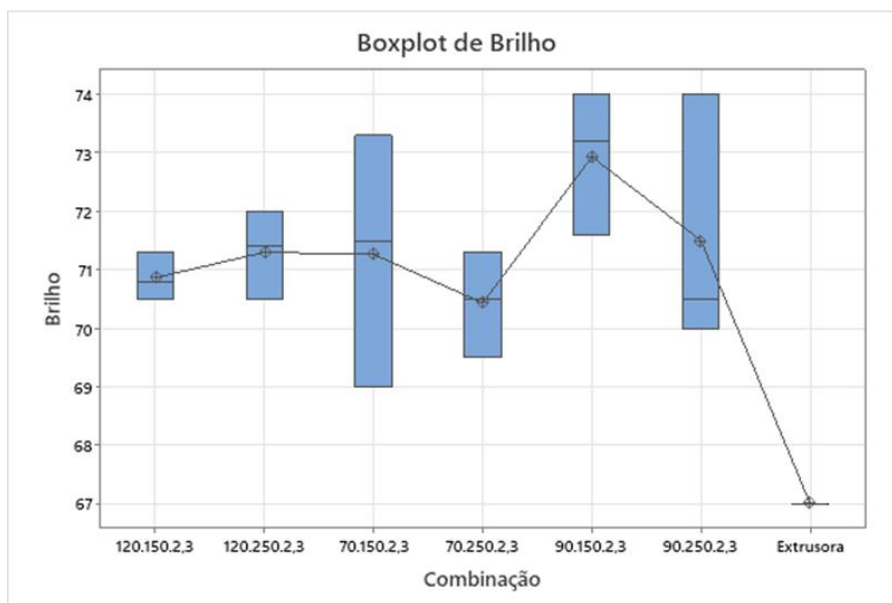
Os dados obtidos para as diferentes combinações estão presentes na Tabela C. 1 e o teste de Tukey correspondente na Figura 3.15 (a).

Na Figura 3.15 (a), identifica-se que o valor da extrusora apenas partilha grupo com a combinação 70.250.2,3, letra B, o que significa que existem diferenças estatisticamente significativas. É de notar que todas as combinações estão acima dos limites considerados.

De acordo com o que consta no gráfico da Figura 3.15 (b), correspondente ao gráfico *boxplot* para os valores do brilho do produto B, a combinação comparativa com as condições de APM (120.150.2,3), apesar de revelarem menor variabilidade do que nos outros produtos analisados anteriormente, a média da combinação encontra-se distante do valor da extrusora, e ainda, superior ao limite superior estipulado.

Combinação	Média	Agrupamento
90.150.2,3	72,9	A
90.250.2,3	71,5	A
120.250.2,3	71,3	A
70.150.2,3	71,3	A
120.150.2,3	70,9	A
70.250.2,3	70,4	A B
Extrusora	67,0	B

(a)



(b)

Figura 3.15 Teste de Tukey (a) e gráfico *boxplot* de acordo com as diferentes combinações (b), para o produto C.

Produto D

O produto D corresponde a um epóxi-poliéster texturado escuro, cujo valor obtido na produção foi de 15 UB, no entanto, teve uma correção do brilho, pelo que tomou o valor de 10 UB. O intervalo de valores de brilho considerado pela empresa é de 7 a 11 UB. A extrusão deste produto na APM é, habitualmente, realizada nas condições standard, ou seja, nas mesmas que a combinação 90.250.2,3.

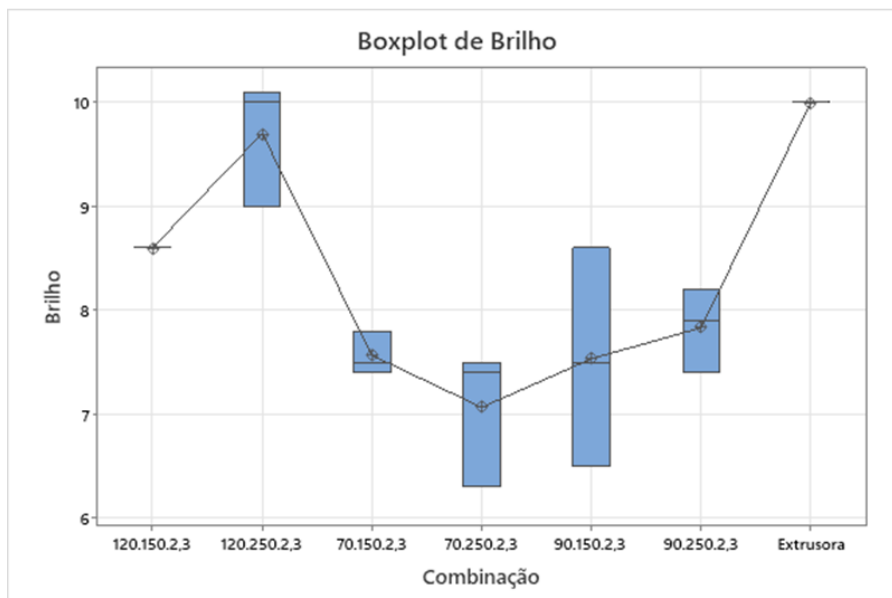
Com os valores de brilho obtidos para as diferentes combinações, presente na Tabela D. 1, realizou-se o teste de Tukey, representado na Figura 3.16 (a).

Observando a Figura 3.16 (a) é de notar que a extrusora partilha o mesmo grupo, letra A, com as combinações cujo fator X é de 120, permitindo concluir que não existem diferenças estatisticamente significativas entre estes.

Foi ainda elaborado um gráfico *boxplot* para os valores do brilho, com o intuito de se avaliar a variabilidade dos dados, que se encontra demonstrado na Figura 3.16 (b). O gráfico da Figura 3.16 (b) mostra que existe uma grande variabilidade dos resultados na combinação 90.250.2,3, sendo esta considerada a condição standard na empresa. Contudo, uma grande variabilidade como a que se verifica resulta em imprevisibilidade dos dados, não permitindo prever se os valores obtidos em APM são ou não sempre idênticos aos obtidos na produção.

Combinação	Média	Agrupamento
Extrusora	10,0	A
120.250.2,3	9,7	A
120.150.2,3	8,6	A B
90.250.2,3	7,8	B
70.150.2,3	7,6	B
90.150.2,3	7,5	B
70.250.2,3	7,1	B

(a)



(b)

Figura 3.16 Teste de Tukey (a) e gráfico *boxplot* de acordo com as diferentes combinações (b), para o produto D.

Produto E

O produto E é um epóxi-poliéster texturado escuro, sendo que os limites deste são de 7 a 11 UB. Em produção obteve-se o valor de 16 UB que se revelava superior aos limites, pelo que teve que ser sujeito a uma correção do brilho, tomando o valor de 9 UB. Contudo, a primeira amostra em APM teve 5,1 UB, notando-se uma discrepância bastante elevada entre produção e APM.

Como se conclui que não existiam diferenças significativas entre as médias das diferentes combinações, não se efetuou o teste de Tukey, visto que este é um teste utilizado para identificar os grupos que se distinguem entre si. Contudo, procedeu-se ao gráfico *boxplot* para os valores do brilho obtidos, que se encontra representado na Figura 3.17.

Analisando a representação gráfica da Figura 3.17, entende-se que todas as *boxplots* têm dimensões consideráveis, indicando que existe grande variabilidade dos dados. A combinação que mais se destaca relativamente à variabilidade é a 70.250.2,3.

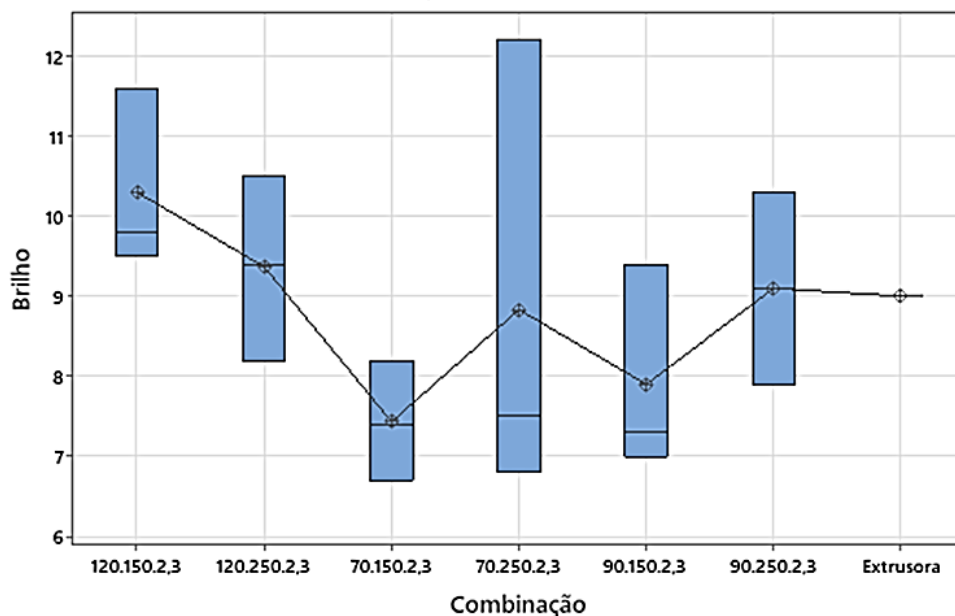


Figura 3.17 Gráfico *boxplot* de acordo com as diferentes combinações para o produto E.

Produto F

O produto F é um epóxi-poliéster texturado escuro, cujo valor obtido em APM foi de 3,7 UB e na produção de 6 UB, sendo que o intervalo de brilhos considerado é de 5 a 8 UB. Através do valor obtido em APM, percebe-se que existia uma necessidade de

corrigir a pré-mistura, contudo, quando comparado com a extrusora de produção, o brilho estava em conformidade com o imposto.

Com base nos valores presentes na Tabela F. 1, elaborou-se um gráfico *boxplot* que se encontra representado na Figura 3.18. É de notar que o fator Z considerado neste produto foi de 1,6, uma vez que o aparelho não conseguia atingir os 2,3, devido à sua granulometria.

O gráfico da Figura 3.18 demonstra que nas combinações 90.150.1,6 e 120.150.1,6 se verifica uma grande variabilidade dos dados, visível pela largura da *boxplot*. Percebe-se ainda que as médias das combinações cujo fator X é de 70, se encontram abaixo do limite inferior de brilho, de 5 UB.

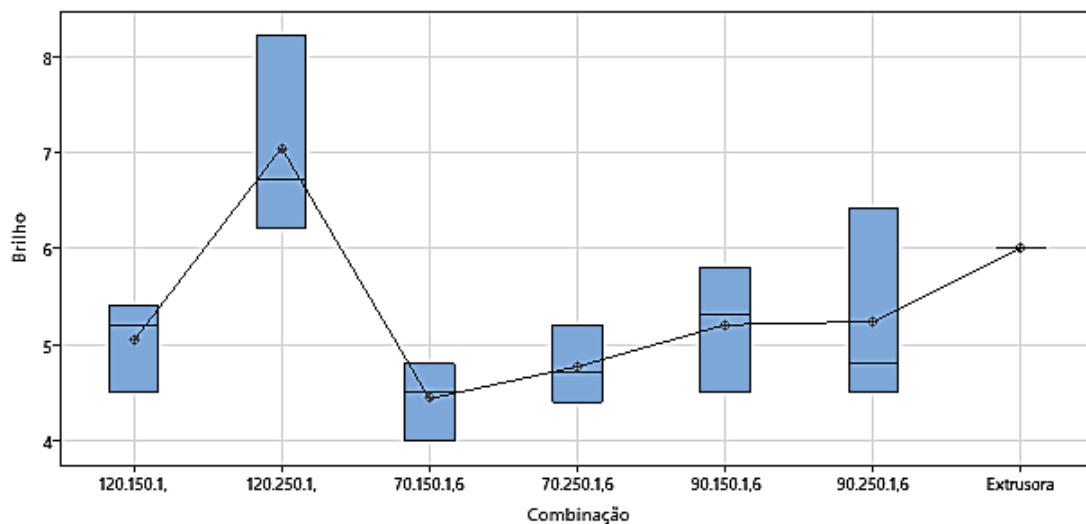


Figura 3.18 Gráfico *boxplot* para o produto F de acordo com as diferentes combinações.

Produto G

O produto G é um epóxi-poliéster texturado escuro, em que se obteve em APM 6,4 UB, e na produção 9,2 UB. Como os limites de brilho estão compreendidos entre 6 e 8 UB, verificou-se que o valor da produção estava em não conformidade, pelo que se teve que efetuar uma correção na pré-mistura, tomando o valor de 6 UB.

De acordo com os valores presentes na Tabela G. 1, construiu-se um gráfico *boxplot* para os dados do produto G, que consta na Figura 3.19. De salientar que para este produto se considerou o fator Z igual a 1,9, dado que a máquina não conseguiu atingir 2,3.

Observando a Figura 3.19, é perceptível que as combinações com o fator X igual a 70 e a 90.150.1,9 se encontram abaixo do limite inferior estipulado, de 6 UB. Conclui-se ainda que apesar da média dos valores da combinação 90.250.1,9 ser a mais próxima de 6 UB (valor obtido após a correção) é também a *boxplot* maior, indicando que é também a combinação com maior variabilidade.

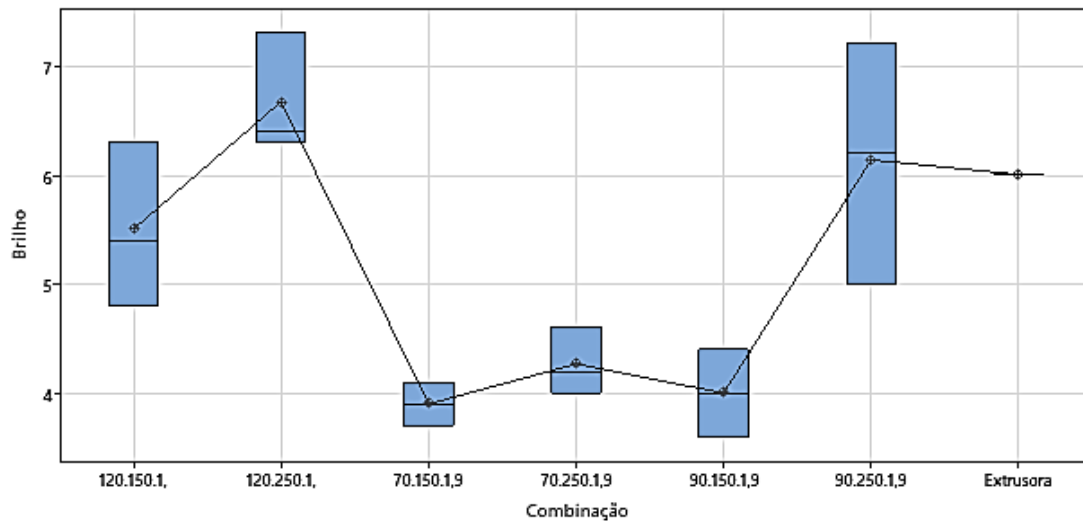


Figura 3.19 Gráfico boxplot para o produto G de acordo com as diferentes combinações.

Com o intuito de verificar se existia alguma combinação que se pudesse descartar calcularam-se os erros relativos para cada epóxi-poliéster texturado, tendo em conta o respetivo valor obtido na produção. O gráfico resultante encontra-se na Figura 3.20.

Como é perceptível pelo gráfico de barras, da Figura 3.20, todos os epóxi-poliésteres texturados em estudo apresentam erros relativos maiores para as combinações cujo fator X é de 70, estando estes destacados a vermelho no gráfico. Deste modo, as combinações com fator X igual a 70 foram descartadas para esta gama de produtos, sendo que para o produto H, não se efetuaram ensaios nestas condições.

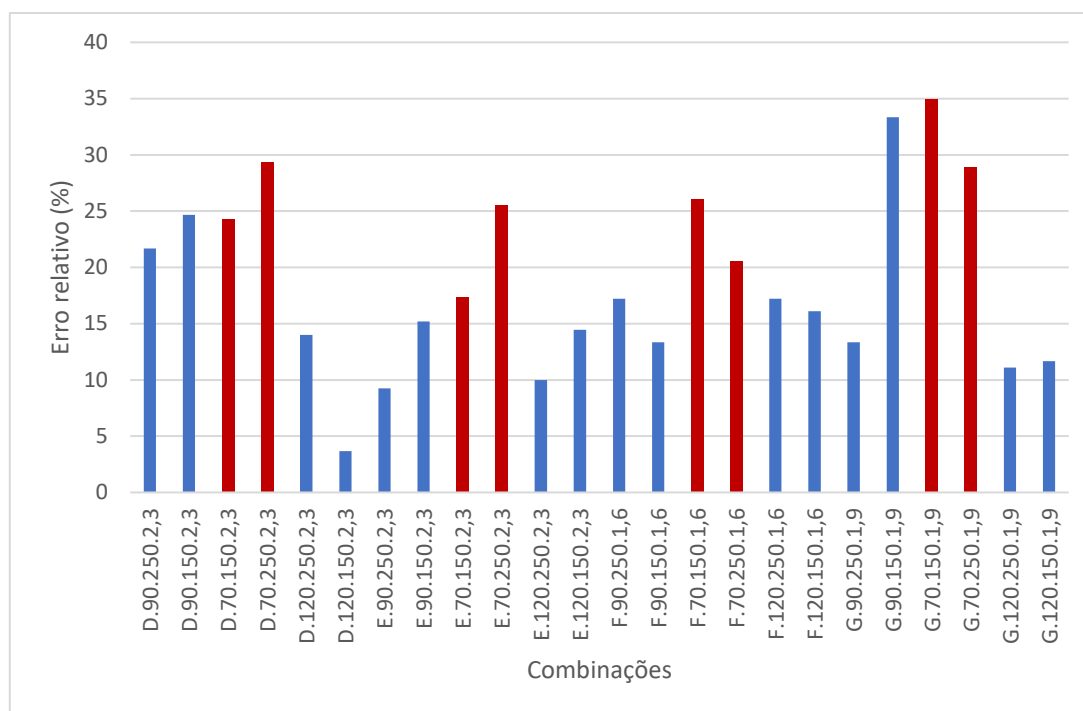


Figura 3.20 Representação gráfica dos erros relativos para cada combinação, dos produtos D, E, F e G.

Produto H

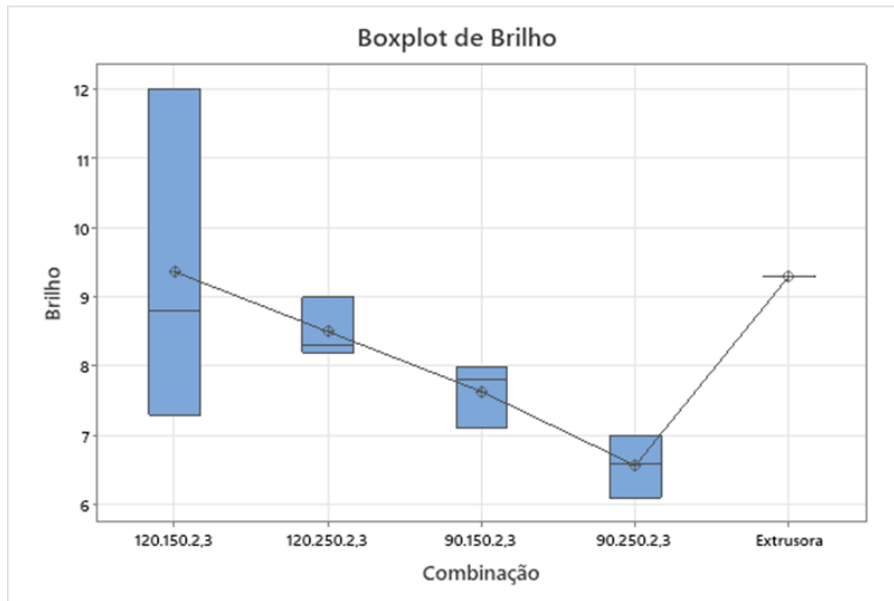
O produto H corresponde a um epóxi-poliéster texturado claro, cujo valor obtido em produção foi de 9,3 UB e os limites impostos pela empresa situam-se entre 6 e 9 UB. Os valores considerados para o teste de Tukey, presente na Figura 3.21 (a), baseiam-se nos valores da Tabela H. 1.

Tendo em conta o teste de Tukey para o produto H, conclui-se que todas as médias das combinações partilham do mesmo grupo, letra A, sendo que não se verifica a existência de diferenças estatisticamente significativas. Além disso, também se verifica que praticamente todas as médias das combinações se encontram conformes com os valores limites estabelecidos. De modo a complementar o teste de Tukey, elaborou-se o gráfico *boxplot* para os valores do brilho, cuja sua representação se encontra na Figura 3.21 (b).

Analisando o gráfico da Figura 3.21 (b), é possível compreender que a combinação 120.150.2,3 apresenta uma grande variabilidade dos dados, comparativamente às outras combinações, por exemplo, nas condições standard (90.250.2,3), a *boxplot* revela-se mais achatada. Deste modo, maior variabilidade resulta em maior imprevisibilidade.

Combinação	Média	Agrupamento
120.150.2,3	9,4	A
Extrusora	9,3	A
120.250.2,3	8,5	A
90.150.2,3	7,6	A
90.250.2,3	6,6	A

(a)



(b)

Figura 3.21 Teste de Tukey (a) e gráfico boxplot de acordo com as diferentes combinações (b), para o produto H.

Produto I

O produto I é um poliéster texturado escuro, sendo que a primeira amostra retirada para APM obteve um valor de 5 UB, e na produção de 8,9 UB, revelando-se fora dos intervalos considerados, compreendido entre 6 e 7,5 UB. Deste modo, procedeu-se à correção da pré-mistura, sendo que posteriormente, o brilho obtido foi de 6,6 UB. Através dos valores obtidos, que constam na Tabela I. 1, procedeu-se ao teste de Tukey, cujo resultado se encontra na Figura 3.22 (a).

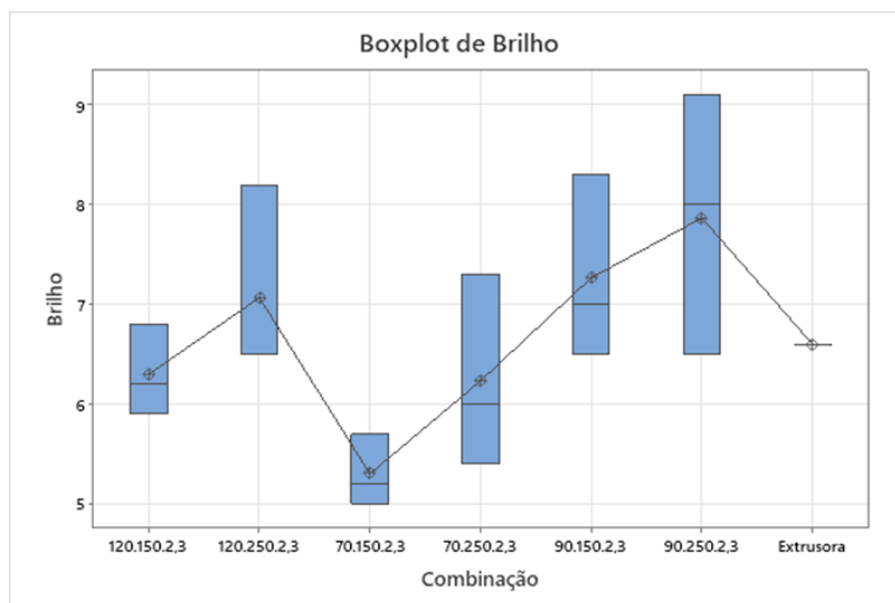
Considerando o teste de Tukey, concluiu-se que existem diferenças estatisticamente significativas entre o valor da produção e a média dos valores da combinação 70.150.2,3. Percebe-se que o teste a este produto revela que quase todos os grupos pertencem simultaneamente a 2 agrupamentos, o que era esperado uma vez que o valor-p se mostrou relativamente alta (0,041). Contudo, a combinação 90.250.2,3, considerada a combinação dos fatores para as condições standard em APM, revela-se ligeiramente

acima do limite superior estabelecido, de 7,5 UB. Foi ainda elaborado um gráfico *boxplot* para os valores do brilho das diferentes combinações, representado na Figura 3.22 (b).

Através da Figura 3.22 (b), destaca-se a variabilidade dos resultados para as condições standard (90.250.2,3), pelo que não se pode prever o comportamento dos resultados naquelas condições. É perceptível ainda que também para as combinações 120.250.2,3, 70.250.2,3 e 90.150.2,3 existe grande variabilidade.

Combinação	Média	Agrupamento
90.250.2,3	7,9	A
90.150.2,3	7,3	A B
120.250.2,3	7,1	A B
Extrusora	6,6	A B
120.150.2,3	6,3	A B
70.250.2,3	6,2	A B
70.150.2,3	5,3	B

(a)



(b)

Figura 3.22 Teste de Tukey (a) e gráfico *boxplot* de acordo com as diferentes combinações (b), para o produto I.

Produto J

O produto J corresponde a um poliéster texturado claro, sendo que para APM se obteve um valor de 12 UB, e na produção de 10,5 UB. De notar que o intervalo estabelecido na empresa para este produto é de 10 a 15 UB. Como se concluiu que o valor-p obtido para este produto foi relativamente elevado (0,174), constata-se que não existem

diferenças significativas entre as médias das diferentes combinações e, portanto, não se efetuou o teste de Tukey para este produto.

Traçou-se ainda um gráfico *boxplot* para o brilho, cuja sua representação se encontra na Figura 3.23 (b). Através da Figura 3.23 (b), observa-se que as *boxplots* são bastante largas, principalmente as das combinações 120.150.2,3, 90.150.2,3 e 90.250.2,3, o que permite afirmar que existe um desvio padrão relativamente grande nestes dados.

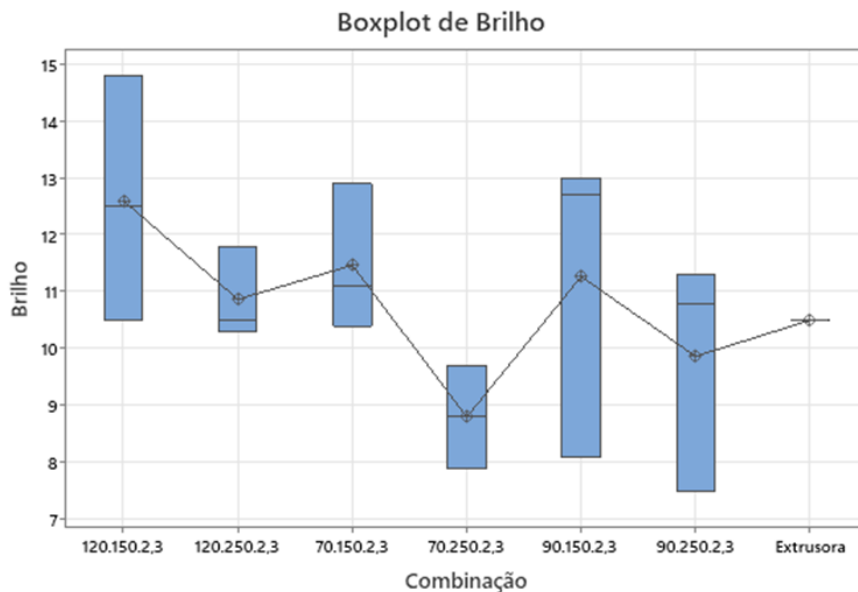


Figura 3.23 Gráfico *boxplot* de acordo com as diferentes combinações para o produto J.

Produto K

O produto K é um produto poliéster texturado escuro, em que o valor obtido em APM foi de 3,8 UB e na produção de 4 UB. O intervalo de valores de brilho deste produto é de 4 a 5 UB.

Com os valores obtidos para as diferentes combinações, presentes na Tabela K. 1, recorreu-se ao teste de Tukey, em que o seu resultado se encontra na Figura 3.24 (a). É importante referir que não foram efetuados ensaios considerando o fator X de 70, dado que a pré-mistura acabou, devido à necessidade de utilizar o mesmo produto para calibrar a alimentação, pelo que não permitiu efetuar todos os ensaios.

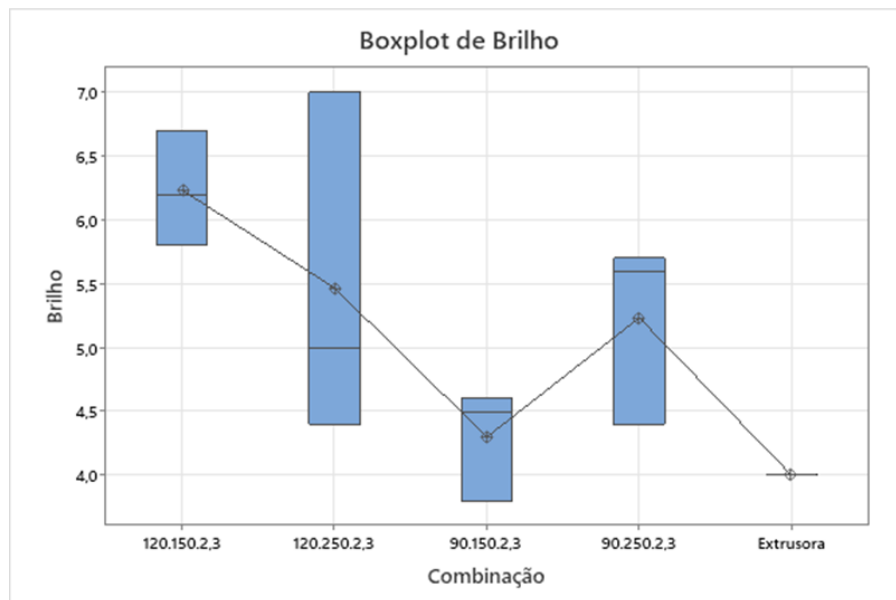
Observando o resultado do teste de Tukey (Figura 3.24 (a)), percebe-se que a média da combinação 120.150.2,3 não partilha o mesmo grupo, letra B, que a extrusora, aferindo-se que existem diferenças estatisticamente significativas entre estes. Contudo,

tendo em conta os limites, conclui-se que apenas a combinação 90.150.2,3 está em conformidade com os mesmos.

Com o objetivo de completar este teste, realizou-se um gráfico *boxplot* para o brilho, como se pode verificar na Figura 3.24 (b). Assim, constata-se que a combinação 120.250.2,3 apresenta grandes desvios padrão.

Combinação	Média	Agrupamento
120.150.2,3	6,3	A
120.250.2,3	5,5	A B
90.250.2,3	5,2	A B
90.150.2,3	4,3	A B
Extrusora	4,0	B

(a)



(b)

Figura 3.24 Teste de Tukey (a) e gráfico *boxplot* de acordo com as diferentes combinações (b), para o produto K.

3.4. Improve

O principal objetivo desta fase é melhorar o desempenho do processo. Na etapa *Improve* é realizada uma análise dos dados obtidos nos testes apresentados nas etapas anteriores, nomeadamente, a análise do desenho de experiências, através da análise da regressão do modelo obtido. É ainda abordado o estudo de repetibilidade num produto liso e num produto texturado.

3.4.1. Análise do Desenho de Experiências

Através do DoE, mencionado no capítulo 3.1.2, efetuou-se a análise do mesmo. O software *Minitab* fornece 4 tipos de informação relativa à análise de regressão, nomeadamente, a equação da regressão, a tabela dos coeficientes, sumário do modelo e a análise de variância, que serão explicados de forma sucinta de seguida.

Quanto ao sumário do modelo de regressão, teve-se em conta o valor do R^2 (coeficiente de determinação), mas essencialmente o R^2 ajustado, uma vez que foi necessário comparar modelos com diferentes números de parâmetros para se verificar qual deles se enquadrava melhor. A principal diferença entre o R^2 e o R^2 ajustado é que o primeiro aumenta sempre que se adiciona um preditor ao modelo, mesmo que não se note uma melhoria. Em contraste, o segundo é mais adequado quando se comparam modelos, com diferentes preditores, pelo que este integra o número de preditores, de modo a descontar o efeito destes no modelo [42]. O modelo de regressão de cada produto foi escolhido tendo em conta o R^2 ajustado.

Os valores dos coeficientes de ajuste do modelo de regressão podem indicar o tamanho e a direção da relação entre um preditor e a resposta. Se o coeficiente for positivo, indica que o termo aumenta, acontecendo o oposto quando se está perante um coeficiente negativo, isto é, o termo diminui [43]. Na tabela dos coeficientes está também representado o *variance inflation factor* (VIF) para cada termo, pelo que este corresponde ao fator de inflação de variância, indicando a quantidade de multicolinearidade, isto é, a correlação entre os preditores, existente na análise da regressão. Quando se verifica um valor elevado do VIF (superior a 5), conclui-se que os preditores estão altamente relacionados, o que torna mais difícil compreender o impacto individual de cada termo sobre a resposta. Assim, um VIF elevado pode indicar também que o coeficiente estimado, pode não ser o mais correto devido à sua multicolinearidade. Se o VIF for igual a 1, percebe-se que os preditores não estão correlacionados, pelo que se o VIF estiver compreendido entre 1 e 5 conclui-se que os preditores estão moderadamente correlacionados [43].

Relativamente à análise de variância de ajuste do modelo de regressão, é de realçar o valor-p de cada termo considerado. Este parâmetro permite concluir se a associação entre a resposta, neste caso o brilho, e cada termo do modelo é estatisticamente significativa, quando comparado com o nível de significância assumido, de 0,05. É, portanto, a probabilidade que define a evidência contra a hipótese nula, que neste contexto é que não há nenhuma associação entre o termo e a resposta [44].

É de salientar também o valor-p do teste de ajuste, cuja hipótese nula é que o modelo especifica a relação entre a resposta e os preditores corretamente, pelo que se se verificar um valor-p maior que 0,05 se conclui que o modelo não deteta nenhuma parcela em falta no modelo, não sendo necessário adicionar termos ao mesmo [44].

Como se pode verificar pela análise da regressão, presente na Figura A. 4, para o produto A, percebe-se que o termo com maior influência no modelo é o termo quadrático do fator X (Fator X*Fator X), uma vez que este apresenta um valor-p menor que 0,05 (0,030), pelo que se pode aferir que existe uma associação estatisticamente significativa entre o termo em causa e a variável resposta, neste caso, o brilho. O valor-p para a falha de ajuste do erro toma o valor de 0,233 (maior que 0,05), concluindo-se que não se deteta nenhum teste de ajuste.

Quanto aos restantes produtos epóxi-poliésteres satinados, produto B (Figura B. 4) e C (Figura C. 3), ambos apresentam o valor-p menor que 0,05 para o fator X, concluindo-se que existe uma associação estatisticamente significativa entre este fator e o brilho. De salientar que também ambos apresentam valor-p relativo à falta de ajuste do erro superior ao nível de significância, pelo que não é possível aferir que o modelo não especifica corretamente a relação. Contudo, o produto C tem um coeficiente de correlação ajustado de 7,01% o que se revela muito baixo.

Para o produto D, cuja análise da regressão se encontra na Figura D. 3, conclui-se que a interação do fator X e do fator Y (Fator X*Fator Y) influencia significativamente o modelo do ponto de vista estatístico, uma vez que o valor-p obtido para este termo é de 0,036. O valor-p para o teste de ajuste também se revela superior a 0,05 pelo que se conclui que o teste não deteta nenhuma parcela em falta de ajuste, ou seja, não é necessário incluir mais termos no modelo.

O produto E, do qual a sua análise da regressão está presente na Figura E. 3, não apresenta nenhuma associação estatisticamente significativa entre nenhum termo e o brilho, visto que todos os valor-p dos termos considerados se revelam superiores ao nível de significância de 0,05. Além disso, também o R^2 ajustado do modelo toma um valor muito baixo, de 13,32%, permitindo concluir que não existe correlação.

Relativamente ao produto F, cuja análise da regressão se apresenta na Figura F. 4, verifica-se que a interação do fator X com o fator Y (Fator X*Fator Y) tem influência estatisticamente significativa no modelo, visto que o valor-p deste termo é de 0,003. Através do valor-p do teste de ajuste é perceptível que não é possível concluir que o modelo não especifica corretamente a relação.

Verifica-se que existe associação estatisticamente significativa entre o fator X e o fator Y com o brilho para o produto G (Figura G.3). De realçar que o VIF dos fatores X e Y são iguais a 1, pelo que se conclui que estes dois preditores não se encontram correlacionados.

O produto H, cuja sua análise da regressão está apresentada na Figura H. 2, revela que o fator X influencia significativamente o modelo, uma vez que o seu valor-p é de 0,026, ou seja, inferior ao nível de significância. De salientar, que tal como no produto G, também o produto H apresenta o valor de VIF para o fator X e para o fator Y igual a 1, o que indica que estes preditores não se correlacionam.

Relativamente ao produto I, a análise da regressão encontra-se na Figura I. 3, sendo que se percebe que o fator X e o seu termo quadrático (Fator X*Fator X) têm influência estatisticamente significativa no modelo. Como o valor-p do teste de ajuste, tem o valor de 0,707, entende-se que não é necessário ter em conta mais termos na regressão.

Quanto ao produto J, é possível concluir que existe associação estatisticamente significativa entre o fator Y e o brilho, dado que o valor-p deste termo é de 0,009 (Figura J. 3). O valor de VIF quer para o termo do fator Y quer para o termo da interação do fator X e Y (Fator X*Fator Y) é de 2,21, que revela que os preditores estão moderadamente correlacionados. De salientar que o valor-p do teste de ajuste é superior a 0,05 pelo que não se pode aferir que o modelo não especifica corretamente a relação.

Na Figura K. 3 apresenta-se a regressão do produto K, não existindo nenhuma associação estatisticamente significativa entre o brilho e os termos considerados, devido ao facto de todos os valor-p obtidos serem superiores a 0,05. De notar que o valor do R^2 ajustado toma o valor de 32,4%, demonstrando-se relativamente baixo.

Posteriormente, ponderou-se se a espessura obtida para cada chapa influenciava significativamente, ainda que de forma indireta, os fatores X e Y. Para tal, recorreu-se ao teste de ANCOVA, que engloba uma covariável, neste caso a espessura.

A ANCOVA é a combinação da ANOVA e a análise de regressão [45]. De salientar que as covariáveis são variáveis independentes que influenciam a variabilidade da variável dependente.

Deste modo, realizou-se um ajuste do modelo linear generalizado considerando uma covariável, no caso a espessura para o produto D, sendo que a análise de variância do modelo se encontra representada na Figura 3.25.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Espessura	1	0,5873	0,58730	1,94	0,201
Fator X	2	1,4574	0,72869	2,41	0,152
Fator Y	1	0,0762	0,07623	0,25	0,629
Espessura*Fator X	2	1,1993	0,59965	1,98	0,200
Espessura*Fator Y	1	0,0750	0,07504	0,25	0,632
Fator X*Fator Y	2	0,5143	0,25713	0,85	0,462
Erro	8	2,4186	0,30232		
Total	17	17,7444			

Figura 3.25 Análise de variância considerando a covariável espessura para o produto D.

As interações da espessura com o fator X e com o fator Y revela que não existe influência estatisticamente significativa, uma vez que o valor-p é superior ao nível de significância, de 0,05 (Figura 3.25). Conclui-se então que a covariável em causa não tem influência significativa no brilho quando conjugada com os fatores X e Y.

De um modo geral, obtiveram-se todos coeficientes de correlação ajustados relativamente baixos para todos os produtos, pelo que se conclui que através do modelo não existe correlação entre os resultados.

3.4.2. Estudo da repetibilidade

O estudo da repetibilidade dos valores de brilho, obtidos através da extrusão em APM, foi efetuado devido à variabilidade que se registava em todos os produtos texturados.

Com o intuito de se perceber se o erro seria do próprio equipamento ou do produto, efetuaram-se 5 extrusões de um produto liso e 10 extrusões de um poliéster texturado, cujos valores obtidos se encontram na Tabela L. 1 e na Tabela L. 2, respetivamente.

Para o produto liso, obteve-se em produção 82,0 UB. Assim, calculou-se o erro relativo para cada amostra, considerando o valor da extrusora de produção como o valor esperado, sendo que o erro médio relativo para este produto foi de 0,88%.

Relativamente ao produto texturado, em produção o valor obtido foi de 7,8 UB, pelo que se considerou este valor para calcular o erro relativo, que se revelou de 32,7%.

Assim, é possível aferir que o produto texturado apresenta um erro relativo muito superior ao liso, o que permite concluir que seria necessário efetuar um estudo de Gauge R&R para os produtos texturados. Este é um teste que efetua a variação do sistema de medição, através de dois fatores, nomeadamente, a repetibilidade e a reprodutibilidade,

sendo que a primeira está relacionada com a variação do equipamento e a segunda com a variação por parte do operador [46]. O propósito deste estudo é determinar a amplitude da variabilidade nos dados obtidos, bem como isolar a variabilidade no sistema de medição e avaliar se o mesmo é adequado para o efeito em causa [47].

Contudo, é de salientar que este estudo mencionado terá que ficar para trabalho futuro, uma vez que não foi possível realizar durante o estágio em causa.

É de extrema importância referir que a última etapa do método DMAIC não foi conseguida, uma vez que não foi possível implementar melhorias, dado que as condições estudadas não se revelaram ótimas para que exista reprodutibilidade entre a APM e a produção. Contudo, é necessário continuar o estudo, tendo em conta tudo o que já foi testado e analisado.

Conclusão

Este projeto surgiu com o intuito de eliminar a falta de reprodutibilidade entre a APM e a extrusora de produção, nos produtos críticos, nomeadamente, produtos texturados e épxi-poliésteres satinados lisos, que apresentam obrigatoriedade de paragem da linha de produção para aprovação. Esta obrigatoriedade resulta em valores mais baixos para o indicador NSY, que conseqüentemente, afeta o indicador OEE, devido à falta de disponibilidade resultante.

Assim, foi necessário fazer um estudo das variáveis do processo e amostragem nos produtos críticos em estudo, traçando um desenho de experiências, com o objetivo de determinar as condições ótimas que garantem a repetibilidade e reprodutibilidade do resultado do brilho entre a APM e a produção.

Inicialmente verificou-se que fatores como a localização na qual é extraída a amostra, a influência das extrusões sequenciais e a temperatura da pasta à saída da extrusora, não influenciavam significativamente o resultado.

O teste de Tukey permitiu avaliar se existiam diferenças estatisticamente significativas entre as médias das diferentes combinações e o valor obtido em produção. Para os produtos épxi-poliésteres satinados, aferiu-se que as combinações cujo fator X é de 120 verificavam-se mais distantes do valor da produção. Relativamente aos produtos épxi-poliésteres texturados, após se analisarem os erros relativos, percebeu-se que as combinações com o fator X igual a 70, apresentavam erros superiores. Deste modo, para o produto H descartaram-se essas combinações. Quanto aos produtos poliésteres texturados, não se pode concluir que existe uma combinação que melhor se adapte aos valores da extrusora de produção.

Após se efetuarem as análises de regressão para cada produto, verificou-se que os coeficientes de correlação são, de forma geral, relativamente baixos, pelo que não se pode atribuir confiança aos modelos obtidos. Através da análise de regressão tendo em conta a espessura como covariável, concluiu-se que esta não tem influência estatisticamente significativa no valor do brilho obtido.

Em suma, as condições estudadas não resultaram numa boa reprodutibilidade entre a APM e a produção.

Numa fase final, concluiu-se que não existe repetibilidade entre os valores de brilho obtidos para produtos texturados, contrariamente ao que se verificou com os produtos lisos. De modo a corroborar esta hipótese, calcularam-se os erros relativos de cada gama,

sendo que se obteve um erro médio relativo de 0,88% para os produtos lisos e de 33% para os produtos texturados.

Futuramente, seria necessário efetuar um estudo de Gauge R&R para os produtos críticos em causa.

Sugere-se ainda que se estude a matéria-prima utilizada nos produtos texturados, nomeadamente, o agente de textura, isto é, o PTFE. Possivelmente, é necessária uma análise do comportamento deste componente ao longo de todo o processo produtivo.

Por outro lado, pode-se também ter em conta outros fatores que não foram estudados no decorrer deste projeto, utilizando outras ferramentas da qualidade, como cartas de controlo, de forma a perceber o comportamento dos resultados obtidos. Para tal, serão necessários mais ensaios para que o estudo estatístico seja mais robusto.

Referências bibliográficas

- [1] “Corporativo CIN.” <https://cin.com/corporate/pt/cin> (acedido em 19 de maio de 2022).
- [2] CIN, “Missão e Estratégia CIN.” <https://cin.com/pt/missao-e-estrategia> (acedido em 2 de dezembro de 2021).
- [3] J. P. Pinto, *Pensamento Lean*. 2014.
- [4] J. Singh and H. Singh, “Kaizen philosophy: a review of literature,” *IUP journal of operations management*, vol. 8, 2009.
- [5] J. P. R. B. Félix, “Uma Metodologia Kaizen para a Gestão de Equipas Operacionais,” Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [6] I. C. B. Pinto, “Implementação de metodologias Lean numa linha de enchimento de bebidas,” Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, 2018.
- [7] SESA SYSTEMS, “Gestão Visual.” <https://www.sesa-systems.pt/gestao-visual> (acedido em 13 de janeiro de 2022).
- [8] Kanbanize, “O que é o Ciclo Plan-Do-Check-Act.” <https://kanbanize.com/pt/gestao-lean/melhoria/o-que-e-o-ciclo-pdca> (acedido em 13 de janeiro de 2022).
- [9] A. D. L. P. Rodrigues, M. S. Santos, M. C. Serra, and E. M. Pinheiro, “A utilização do ciclo PDCA para melhoria da qualidade na manutenção de shuts,” *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, vol. 9, no. 18, pp. 48–70.
- [10] B. Carvalho de Souza, G. Alcântara Pinto, P. Parreira Paula, R. Júnior Lobo, and F. Vinícios Pinto Souza, “Implantação do programa 5S através da metodologia DMAIC,” *Brazilian Journal of Development*, pp. 2163–2179, 2018.
- [11] Terra, “Você sabe o que significa DMAIC?,” May 18, 2018. <https://www.terra.com.br/noticias/voce-sabe-o-que-significa-dmaic-descubra-por-que-essa-sigla-e-importante,00884b354c83851abfd3393058ee36faklh019z6.html> (acedido em 3 de janeiro de 2022).

- [12] K. Institute, “Um mundo sem reclamações. Se calhar é possível.,” May 17, 2016. <https://pt.kaizen.com/blog/post/2016/05/17/um-mundo-sem-reclamacoes-se-calhar-e-possivel> (acedido em 28 de fevereiro de 2022).
- [13] Kanbanize, “Solução de Problemas A3: Combatendo a Causa Raiz.” <https://kanbanize.com/pt/gestao-lean/melhoria/solucao-de-problemas-a3> (acedido em 28 de fevereiro de 2022).
- [14] Kaizen Institute, “Kaizen na Manutenção.” <https://pt.kaizen.com/consultoria/opex/manutencao> (acedido em 3 de março de 2022).
- [15] S. Borris, *Total Productive Maintenance*. 2006.
- [16] D. F. Magalhães, “Implementação de metodologias Lean numa unidade de fabrico de tintas de base aquosa,” Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2019.
- [17] W. H. Bessane, “Estudo das propriedades de fratura de tintas em pó à base de epóxi e poliéster,” Tese de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.
- [18] S. C. F. Miranda, “Desenvolvimento e caracterização de tintas em pó com resistência à água,” Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [19] A. Missiaggia, “Desenvolvimento de tintas em pó base epóxi-poliéster para aplicação em móveis de aço,” Tese de Mestrado, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, 2018.
- [20] B. Utech, *A Guide to high-performance powder coating*. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 2002.
- [21] E. Spyrou, *Powder Coatings Chemistry and Technology*. Vincentz Network, 2013.
- [22] P. M. Guedes, “Controlo do Processo Produtivo das Tintas em pó,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1997.
- [23] CIN, “MEGADIT - aditivo de desgasificação.” <https://cin.com/performance-coatings/pt/7200a-megadit-2> (acedido em 22 de dezembro de 2021).

- [24] V. F. D. Martins, “Estudo e Optimização de Tintas em Pó para Aplicação em Superfícies Difíceis,” Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [25] Racing Colors, “Carta de Cores RAL.” <https://tiendaracingcolors.com/pt/placas-de-amostra/carta-cores-ral.html> (acedido em 6 de janeiro de 2022).
- [26] Fischer, “Qual a melhor maneira de medir revestimentos em pó?,” Jul. 27, 2021. <https://www.helmut-fischer.com/pt/fischer-blog/qual-e-a-melhor-maneira-de-medir-revestimentos-em-po> (acedido em 3 de janeiro de 2022).
- [27] Expondo, “Medidor de espessura de tinta.” https://www.expondo.pt/steinberg-systems-medidor-de-espessura-de-tinta-1400mm-mini-usb-10030312?gclid=CjwKCAiA_omPBhBBEiwAcg7smdBNtNJzK8y_Pq7kf8e8jUPAUzWxxwGCDElk7zrnUFl-H84dSSQrDhoCBuoQAvD_BwE (acedido em 9 de janeiro de 2022).
- [28] A. S. Antunes, “Utilização de cargas funcionais em tintas em pó,” Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [29] BrasEq, “Medidor de Brilho.” <https://www.braseq.com.br/medidor-brilho> (acedido em 10 de janeiro de 2022).
- [30] WS Equipamentos, “Medidor de Brilho.” <https://wsequipamentos.com.br/produto/medidor-de-brilho/> (acedido em 9 de janeiro de 2022).
- [31] Seos Project, “Introdução ao sensoriamento remoto.” <https://seos-project.eu/remotesensing/remotesensing-c01-p05.pt.html> (acedido em 1 de junho de 2022).
- [32] P. Ikematsu, “Estudo da refletância e sua influência no comportamento térmico de tintas refletivas e convencionais de cores correspondentes,” Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- [33] JINHU COLOR POWDER COATING CO.LTD, “Eletrostatic Spray (Tribo).” <https://www.chinapowdercoating.com/tribo-charging/> (acedido em 3 de janeiro de 2022).
- [34] A. I. P. Magalhães, “Estudo da deposição da tinta em pó em superfícies concavas profundas Projecto de Desenvolvimento em Ambiente Empresarial,” Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.

- [35] J. G. Requeijo and A. Abreu, “Aplicação do Desenho de Experiências na Definição de Estratégias Operacionais Área Científica-CT 12,” Jan. 2013.
- [36] C. T. Carroll, *SIX SIGMA for Powerful Improvement A Green Belt DMAIC Training System with Software Tools and a 25-Lesson Course*. 2013.
- [37] C. Carlino, M. F. Junior, B. Santos, A. Robert, and F. Borgess, “Aplicação da Ferramenta da Qualidade (Diagrama de Ishikawa) e do PDCA no Desenvolvimento de Pesquisa para a reutilização dos Resíduos Sólidos de Coco Verde,” Sep. 2010. [Online]. Disponível em: www.ingepro.com.br
- [38] K. R. da Rocha and A. J. Bacelar Júnior, “ANOVA medidas repetidas e seus pressupostos: análise passo a passo de um experimento,” *Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia - ISSN: 1984-5693*, vol. 10, p. 29, Aug. 2018, doi: 10.22407/1984-5693.2018.v10.p.29-51.
- [39] Suporte ao Minitab 18, “Teste de normalidade.” <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/normality/test-for-normality/> (acedido em 5 de junho de 2022).
- [40] Minitab 19 Support, “Overview for Kruskal-Wallis Test.” <https://support.minitab.com/en-us/minitab/19/help-and-how-to/statistics/nonparametrics/how-to/kruskal-wallis-test/before-you-start/overview/> (acedido em 8 de junho de 2022).
- [41] N. Sousa, “Planeamento Experimental usando ANOVA de 1 e 2 fatores com R,” 2017. doi: 10.3102/00346543060001091.
- [42] Suporte ao Minitab 20, “Interpretar os principais resultados para Regressão dos melhores subconjuntos.” <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/20/help-and-how-to/statistical-modeling/regression/how-to/best-subsets-regression/interpret-the-results/key-results/> (acedido em 14 de junho de 2022).
- [43] Suporte ao Minitab 20, “Tabela Coeficientes de Ajuste do modelo de regressão.” <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/20/help-and-how-to/statistical-modeling/regression/how-to/fit-regression-model/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/coefficients-table/> (acedido em 14 de junho de 2022).

- [44] Suporte ao Minitab 20, “Tabela Análise de Variância de Ajuste do modelo de regressão.” <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/20/help-and-how-to/statistical-modeling/regression/how-to/fit-regression-model/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/analysis-of-variance-table/> (acedido em 14 de junho de 2022).
- [45] “Conduzir e interpretar uma ANCOVA unidireccional,” *Profissionais de estatística*. <https://estatistica.pt/conduzir-e-interpretar-uma-ancova-unidireccional/> (acedido em 13 de junho de 2022).
- [46] Quality-One International Discover the Value, “Repetibilidade e Reprodutibilidade do Medidor (Medidor R&R).” <https://quality-one.com/grr/> (acedido em 9 de junho de 2022).
- [47] R. K. Burdick, C. M. Borror, and D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Gauge R&R Studies*. ASA-SIAM Series on Statistics and Applied Probability.

Anexos

Anexo A – Resultados relativos ao produto A

Tabela A. 1 Valores do brilho obtidos para as diferentes combinações e respetivas espessuras, para o produto A.

Combinação	Espessura (μm)	Brilho (UB)
90.250.2,3	112,0	55,0
90.250.2,3	113,3	57,0
90.250.2,3	64,0	52,0
90.150.2,3	57,0	55,5
90.150.2,3	69,0	57,5
90.150.2,3	70,0	53,0
70.150.2,3	64,3	52,5
70.150.2,3	74,7	53,0
70.150.2,3	85,3	55,5
70.250.2,3	91,3	52,3
70.250.2,3	94,0	55,0
70.250.2,3	81,3	54,0
120.250.2,3	77,0	46,5
120.250.2,3	88,3	50,0
120.250.2,3	80,7	48,3
120.150.2,3	87,8	50,5
120.150.2,3	99,7	52,8
120.150.2,3	96,3	55,3

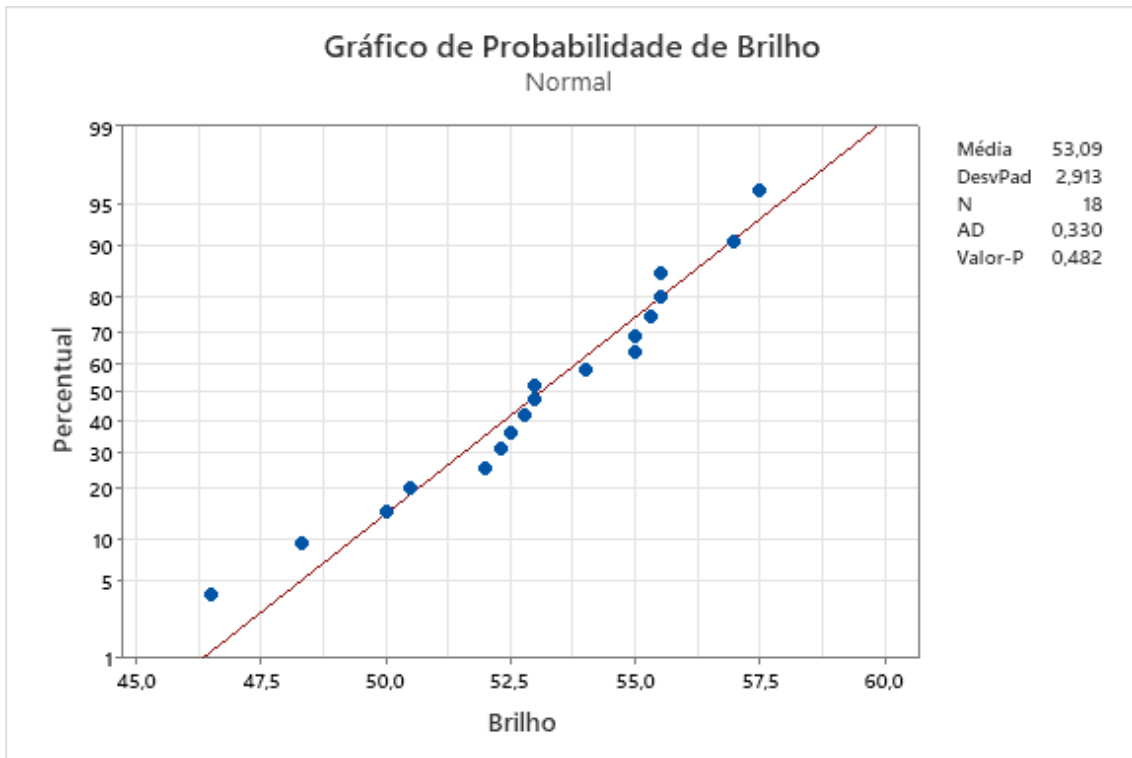


Figura A. 1 Teste de normalidade dos resíduos para o produto A.

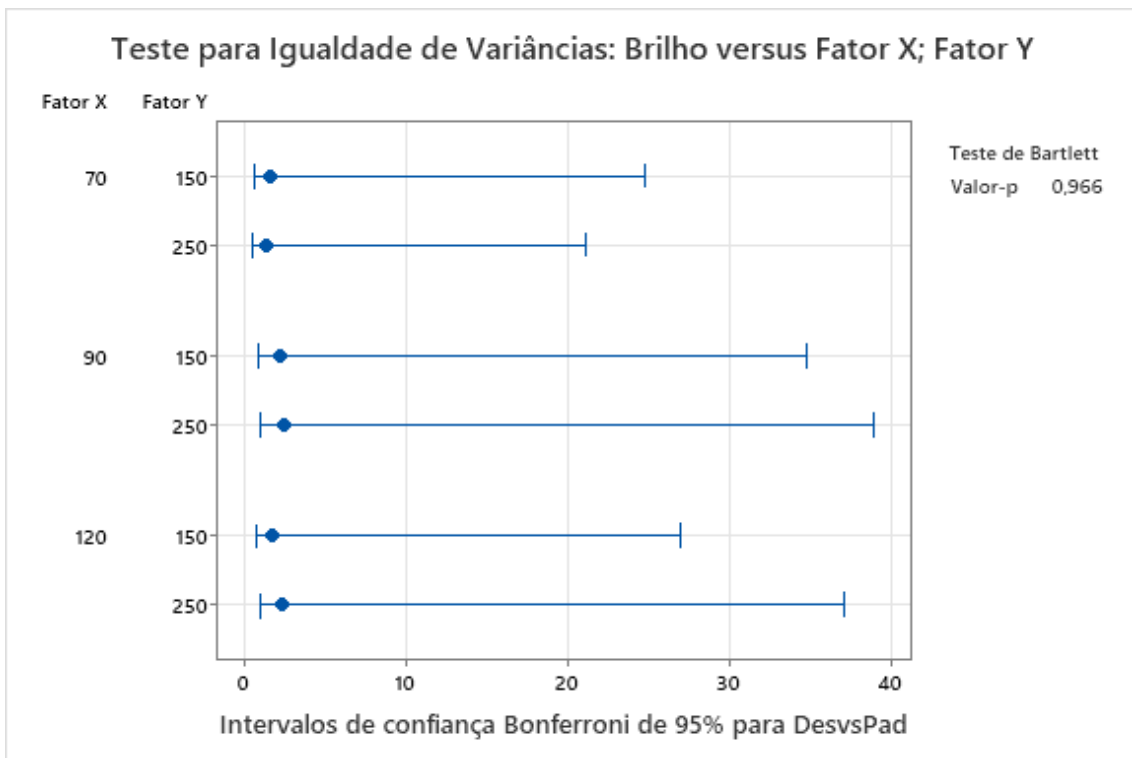


Figura A. 2 Teste de igualdade de variâncias para o produto A.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Combinação	6	116,58	19,430	5,51	0,004
Erro	14	49,38	3,527		
Total	20	165,96			

Figura A. 3 ANOVA com um fator para o produto A.

Equação de Regressão

$$\text{Brilho} = 37,9 + 0,549 \text{ Fator X} - 0,0769 \text{ Fator Y} - 0,00424 \text{ Fator X} \times \text{Fator X} + 0,000968 \text{ Fator X} \times \text{Fator Y}$$

Coefficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	37,9	17,9	2,12	0,054	
Fator X	0,549	0,347	1,58	0,138	213,29
Fator Y	-0,0769	0,0455	-1,69	0,115	21,63
Fator X*Fator X	-0,00424	0,00174	-2,44	0,030	197,29
Fator X*Fator Y	0,000968	0,000476	2,03	0,063	37,63

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
2,07329	61,26%	49,34%	27,16%

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	4	88,368	22,092	5,14	0,010
Fator X	1	10,735	10,735	2,50	0,138
Fator Y	1	12,289	12,289	2,86	0,115
Fator X*Fator X	1	25,534	25,534	5,94	0,030
Fator X*Fator Y	1	17,787	17,787	4,14	0,063
Erro	13	55,881	4,299		
Falta de ajuste	1	6,501	6,501	1,58	0,233
Erro puro	12	49,380	4,115	*	*
Total	17	144,249			

Figura A. 4 Análise da regressão para o produto A.

Anexo B - Resultados relativos ao produto B

Tabela B. 1 Valores do brilho obtidos para as diferentes combinações e respetivas espessuras, para o produto B.

Combinação	Espessura (μm)	Brilho (UB)
90.250.2,3	64,0	55,0
90.250.2,3	63,3	56,0
90.250.2,3	86,3	57,3
90.150.2,3	87,0	56,3
90.150.2,3	73,0	57,0
90.150.2,3	54,7	56,2
70.150.2,3	71,0	57,8
70.150.2,3	93,3	57,3
70.150.2,3	68,0	56,9
70.250.2,3	60,0	56,0
70.250.2,3	86,3	56,4
70.250.2,3	78,3	57,0
120.250.2,3	72,7	54,4
120.250.2,3	88,0	55,0
120.250.2,3	92,3	55,6
120.150.2,3	50,5	54,0
120.150.2,3	49,0	54,8
120.150.2,3	63,0	56,0

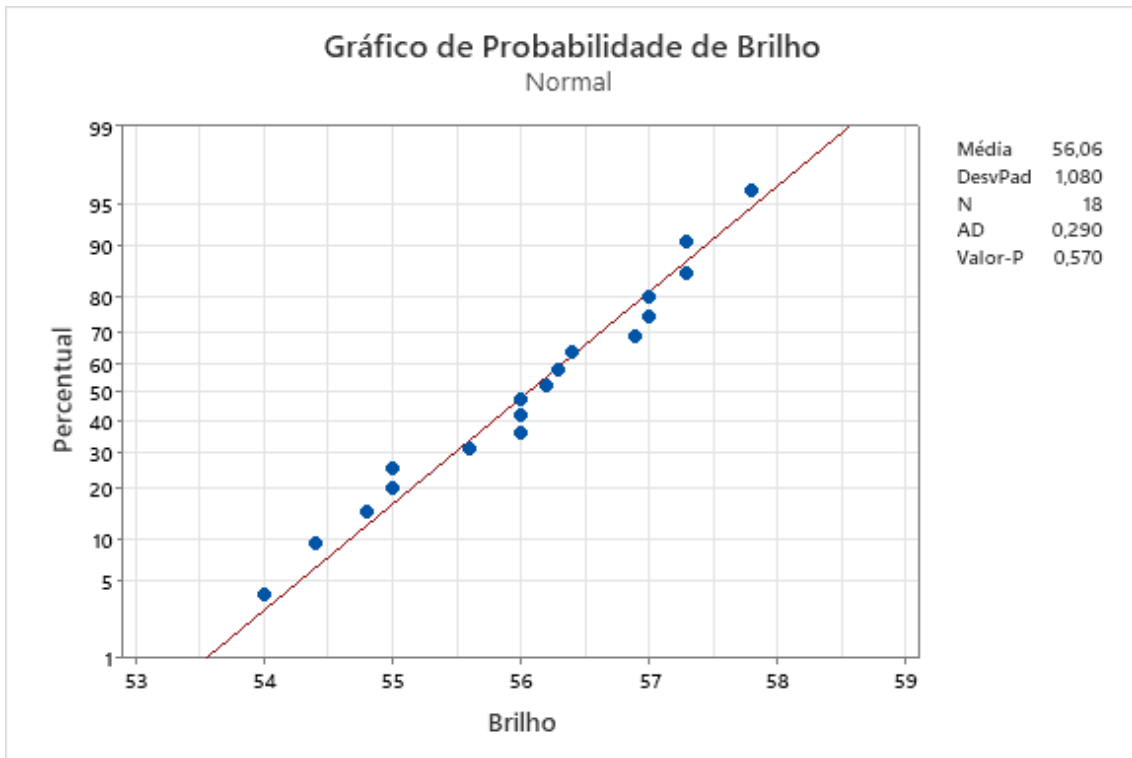


Figura B. 1 Teste de normalidade dos resíduos para o produto B.

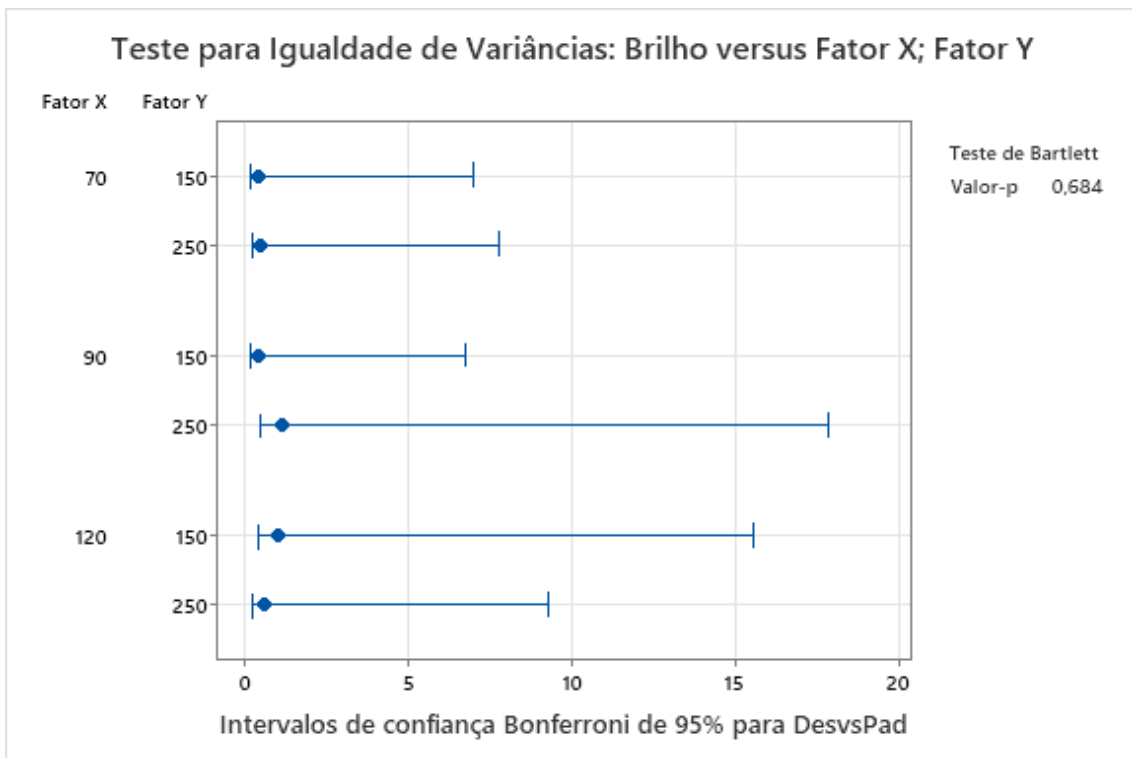


Figura B. 2 Teste de igualdade de variâncias para o produto B.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Combinação	6	15,418	2,5697	5,37	0,005
Erro	14	6,700	0,4786		
Total	20	22,118			

Figura B. 3 ANOVA com um fator para o produto B.

Equação de Regressão

$$\text{Brilho} = 63,95 - 0,0760 \text{ Fator X} - 0,0212 \text{ Fator Y} + 0,000184 \text{ Fator X} \times \text{Fator Y}$$

Coefficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	63,95	3,16	20,26	0,000	
Fator X	-0,0760	0,0330	-2,30	0,037	17,00
Fator Y	-0,0212	0,0153	-1,38	0,188	21,63
Fator X * Fator Y	0,000184	0,000160	1,15	0,269	37,63

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,698324	65,56%	58,18%	43,09%

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	3	12,9973	4,33242	8,88	0,002
Fator X	1	2,5798	2,57983	5,29	0,037
Fator Y	1	0,9343	0,93435	1,92	0,188
Fator X * Fator Y	1	0,6447	0,64474	1,32	0,269
Erro	14	6,8272	0,48766		
Falta de ajuste	2	0,1272	0,06360	0,11	0,893
Erro puro	12	6,7000	0,55833	*	*
Total	17	19,8244			

Figura B. 4 Análise da regressão para o produto B.

Anexo C - Resultados relativos ao produto C

Tabela C. 1 Valores do brilho obtidos para as diferentes combinações e respetivas espessuras, para o produto C.

Combinação	Espessura (μm)	Brilho (UB)
90.250.2,3	77,3	70,5
90.250.2,3	100,7	74,0
90.250.2,3	84,0	70,0
90.150.2,3	105,3	74,0
90.150.2,3	98,7	71,6
90.150.2,3	96,7	73,2
70.150.2,3	78,0	69,0
70.150.2,3	91,0	71,5
70.150.2,3	86,0	73,3
70.250.2,3	86,3	69,5
70.250.2,3	86,0	70,5
70.250.2,3	88,0	71,3
120.250.2,3	82,7	70,5
120.250.2,3	97,3	72,0
120.250.2,3	88,7	71,4
120.150.2,3	97,3	70,8
120.150.2,3	77,7	71,3
120.150.2,3	110,0	70,5

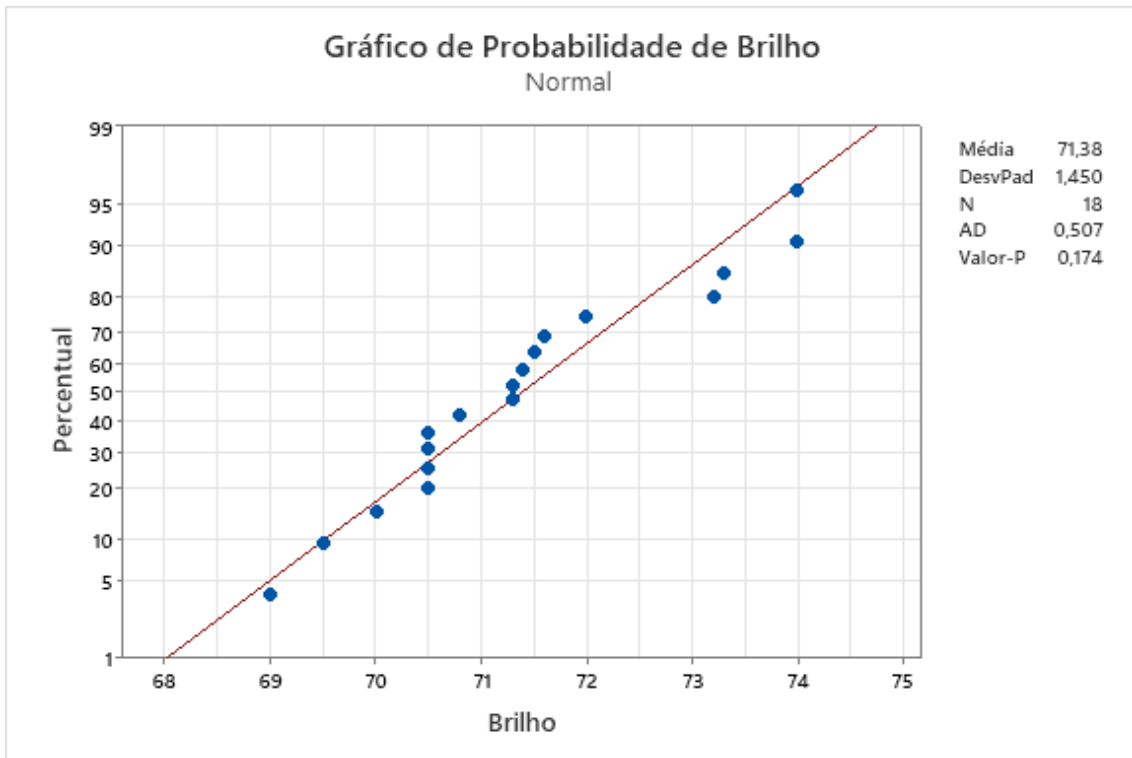


Figura C. 1 Teste de normalidade dos resíduos para o produto C.

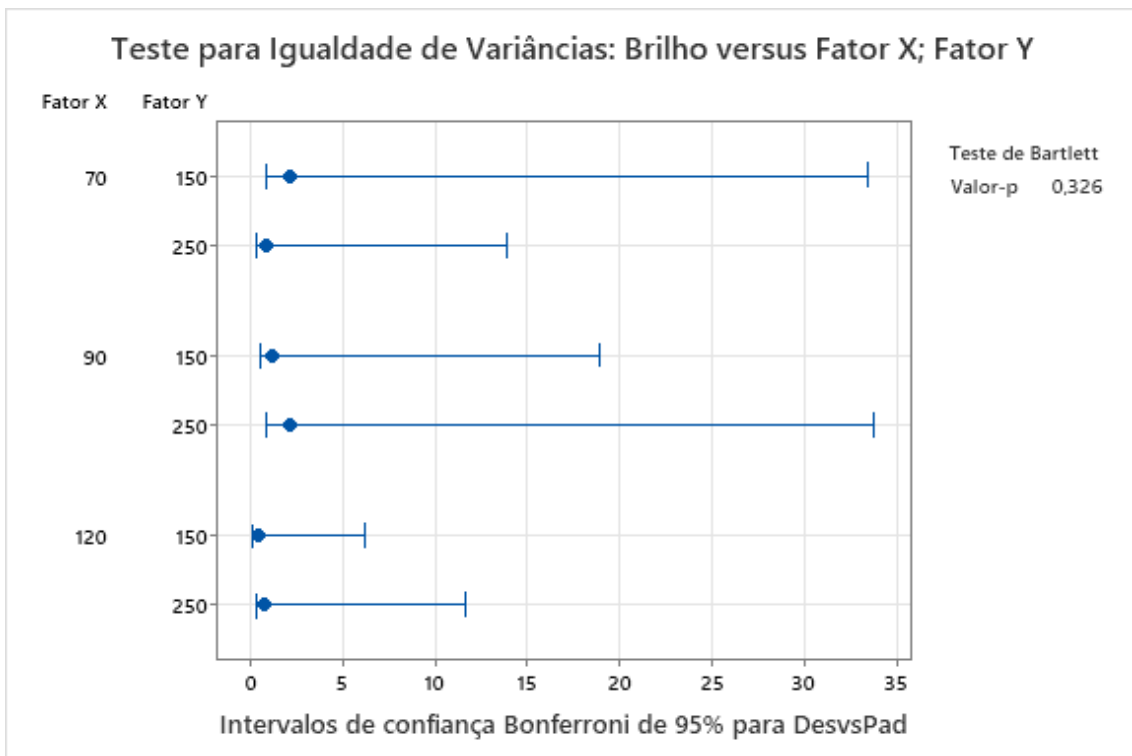


Figura C. 2 Teste de igualdade de variâncias para o produto C.

Equação de Regressão

Brilho = 53,9 + 0,408 Fator X - 0,00611 Fator Y - 0,00212 Fator X*Fator X

Coefficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	53,9	10,5	5,13	0,000	
Fator X	0,408	0,226	1,80	0,093	197,29
Fator Y	-0,00611	0,00662	-0,92	0,372	1,00
Fator X*Fator X	-0,00212	0,00118	-1,80	0,093	197,29

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
1,40487	22,66%	6,08%	0,00%

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	3	8,094	2,698	1,37	0,293
Fator X	1	6,409	6,409	3,25	0,093
Fator Y	1	1,681	1,681	0,85	0,372
Fator X*Fator X	1	6,400	6,400	3,24	0,093
Erro	14	27,631	1,974		
Falta de ajuste	2	2,724	1,362	0,66	0,536
Erro puro	12	24,907	2,076	*	*
Total	17	35,725			

Figura C. 3 Análise da regressão para o produto C.

Anexo D - Resultados relativos ao produto D

Tabela D. 1 Valores do brilho obtidos para as diferentes combinações e respetivas espessuras, para o produto D.

Combinação	Espessura (μm)	Brilho (UB)
90.250.2,3	64,3	8,2
90.250.2,3	79,2	7,4
90.250.2,3	61,2	7,9
90.150.2,3	69,7	8,6
90.150.2,3	72,0	7,5
90.150.2,3	83,3	6,5
70.150.2,3	70,0	7,5
70.150.2,3	71,0	7,8
70.150.2,3	62,0	7,4
70.250.2,3	80,0	6,3
70.250.2,3	98,0	7,4
70.250.2,3	76,3	7,5
120.250.2,3	99,3	8,6
120.250.2,3	89,7	8,6
120.250.2,3	84,0	8,6
120.150.2,3	92,7	10,0
120.150.2,3	68,7	10,1
120.150.2,3	92,3	9,0

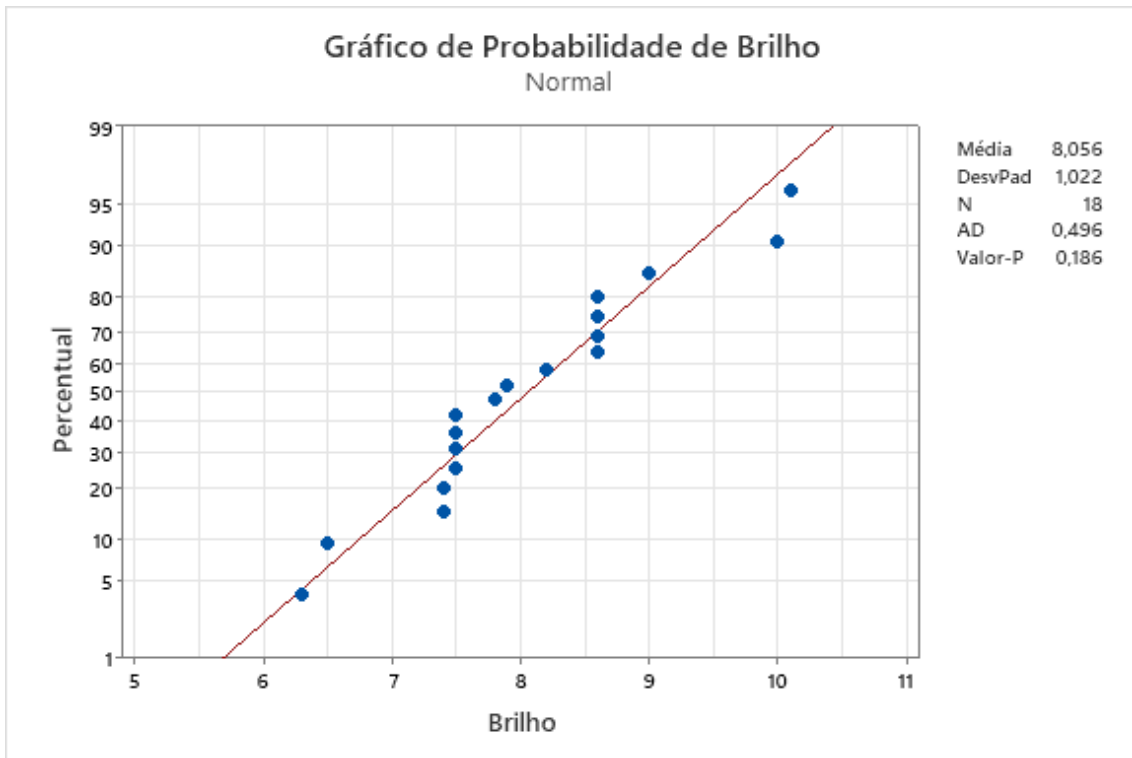


Figura D. 1 Teste de normalidade dos resíduos para o produto D.

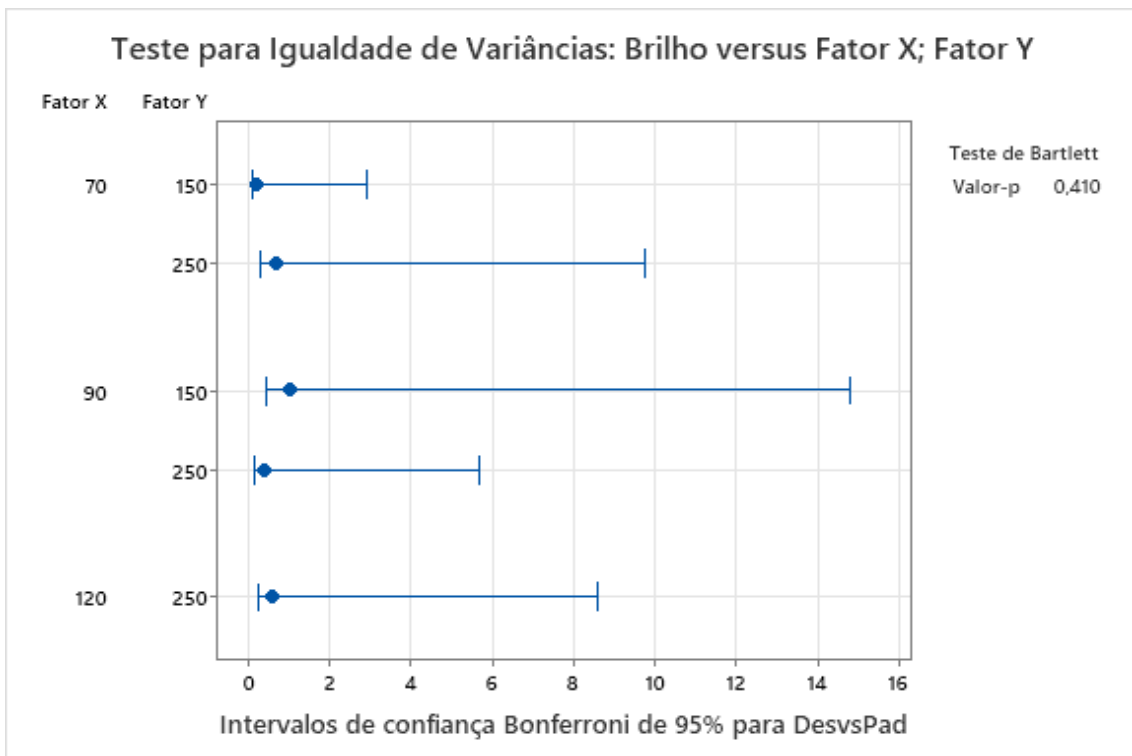


Figura D. 2 Teste de igualdade de variâncias para o produto D.

Equação de Regressão

$$\text{Brilho} = 15,22 - 0,1449 \text{ Fator X} - 0,0258 \text{ Fator Y} + 0,000628 \text{ Fator X} \times \text{Fator X} \\ + 0,000310 \text{ Fator X} \times \text{Fator Y}$$

Coeficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	15,22	4,98	3,06	0,009	
Fator X	-0,1449	0,0968	-1,50	0,158	213,29
Fator Y	-0,0258	0,0127	-2,04	0,063	21,63
Fator X*Fator X	0,000628	0,000485	1,30	0,218	197,29
Fator X*Fator Y	0,000310	0,000133	2,34	0,036	37,63

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,577750	75,55%	68,02%	55,38%

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	4	13,4051	3,35128	10,04	0,001
Fator X	1	0,7479	0,74787	2,24	0,158
Fator Y	1	1,3836	1,38360	4,15	0,063
Fator X*Fator X	1	0,5600	0,56004	1,68	0,218
Fator X*Fator Y	1	1,8218	1,82177	5,46	0,036
Erro	13	4,3393	0,33380		
Falta de ajuste	1	0,0193	0,01934	0,05	0,821
Erro puro	12	4,3200	0,36000	*	*
Total	17	17,7444			

Figura D. 3 Análise da regressão para o produto D.

Anexo E - Resultados relativos ao produto E

Tabela E. 1 Valores do brilho obtidos para as diferentes combinações e respetivas espessuras, para o produto E.

Combinação	Espessura (μm)	Brilho (UB)
90.250.2,3	86,3	9,1
90.250.2,3	78,3	7,9
90.250.2,3	85,7	10,3
90.150.2,3	69,3	7,3
90.150.2,3	82,7	7,0
90.150.2,3	74,7	9,4
70.150.2,3	66,3	7,4
70.150.2,3	73,7	6,7
70.150.2,3	68,0	8,2
70.250.2,3	80,0	12,2
70.250.2,3	62,3	6,8
70.250.2,3	81,7	7,5
120.250.2,3	79,0	8,2
120.250.2,3	75,7	9,4
120.250.2,3	88,7	10,5
120.150.2,3	79,3	9,5
120.150.2,3	77,0	9,8
120.150.2,3	72,7	11,6

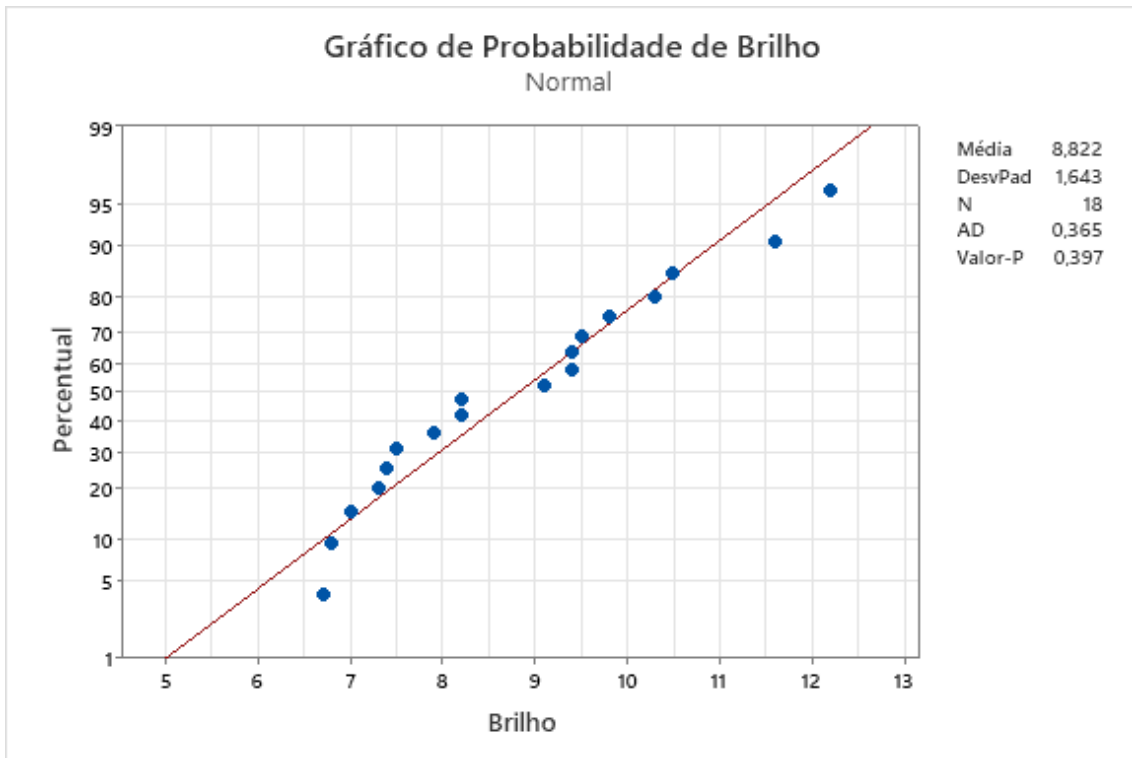


Figura E. 1 Teste de normalidade dos resíduos para o produto E.

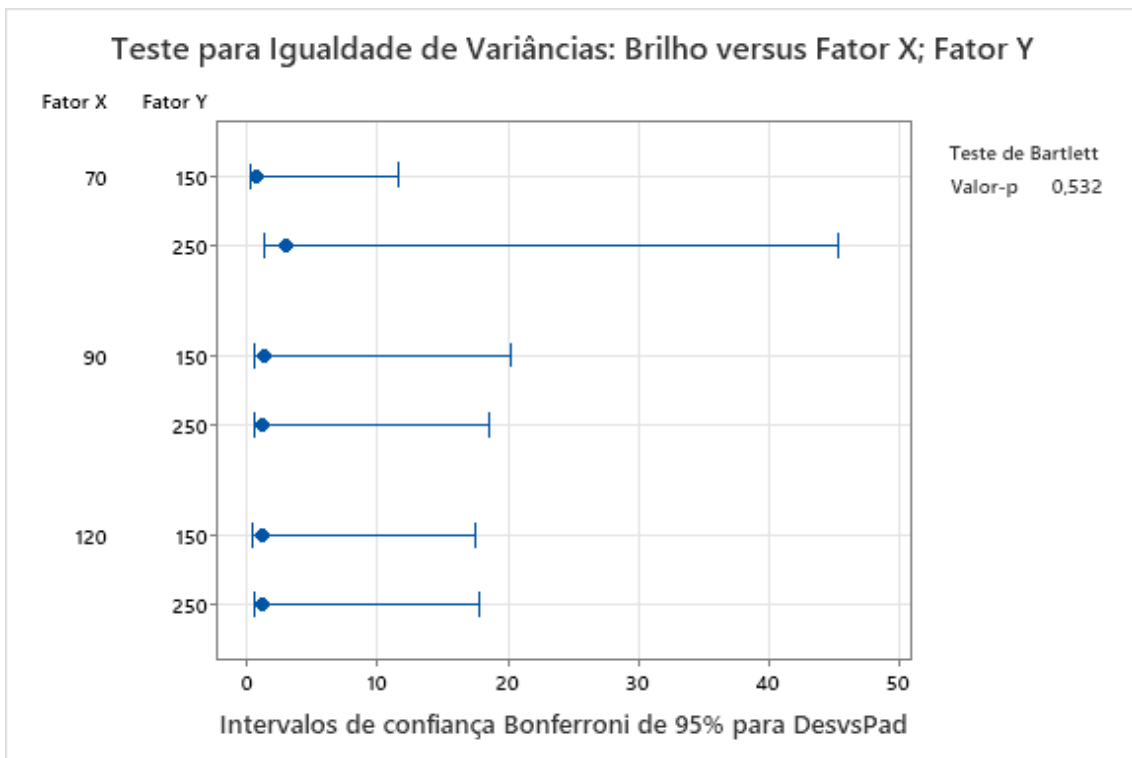


Figura E. 2 Teste de igualdade de variâncias para o produto E.

Equação de Regressão

$$\text{Brilho} = -0,0 + 0,032 \text{ Fator X} + 0,0509 \text{ Fator Y} + 0,00052 \text{ Fator X} \times \text{Fator X} - 0,000486 \text{ Fator X} \times \text{Fator Y}$$

Coefficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	-0,0	13,2	-0,00	0,997	
Fator X	0,032	0,256	0,12	0,903	213,29
Fator Y	0,0509	0,0335	1,52	0,153	21,63
Fator X*Fator X	0,00052	0,00128	0,41	0,691	197,29
Fator X*Fator Y	-0,000486	0,000351	-1,38	0,190	37,63

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
1,52997	33,72%	13,32%	0,00%

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	4	15,4804	3,87010	1,65	0,220
Fator X	1	0,0364	0,03642	0,02	0,903
Fator Y	1	5,3922	5,39224	2,30	0,153
Fator X*Fator X	1	0,3875	0,38754	0,17	0,691
Fator X*Fator Y	1	4,4871	4,48708	1,92	0,190
Erro	13	30,4307	2,34082		
Falta de ajuste	1	0,5307	0,53070	0,21	0,653
Erro puro	12	29,9000	2,49167	*	*
Total	17	45,9111			

Figura E. 3 Análise da regressão para o produto E.

Anexo F - Resultados relativos ao produto F

Tabela F. 1 Valores do brilho obtidos para as diferentes combinações e respetivas espessuras, para o produto F.

Combinação	Espessura (μm)	Brilho (UB)
90.250.1,6	93,7	6,4
90.250.1,6	104,0	4,5
90.250.1,6	94,0	4,8
90.150.1,6	57,7	5,3
90.150.1,6	57,3	4,5
90.150.1,6	81,0	5,8
70.150.1,6	62,0	4,5
70.150.1,6	61,0	4,0
70.150.1,6	64,0	4,8
70.250.1,6	106,7	4,7
70.250.1,6	99,3	4,4
70.250.1,6	88,3	5,2
120.250.1,6	75,1	6,2
120.250.1,6	53,7	8,2
120.250.1,6	74,7	6,7
120.150.1,6	59,7	5,4
120.150.1,6	56,5	5,2
120.150.1,6	64,0	4,5

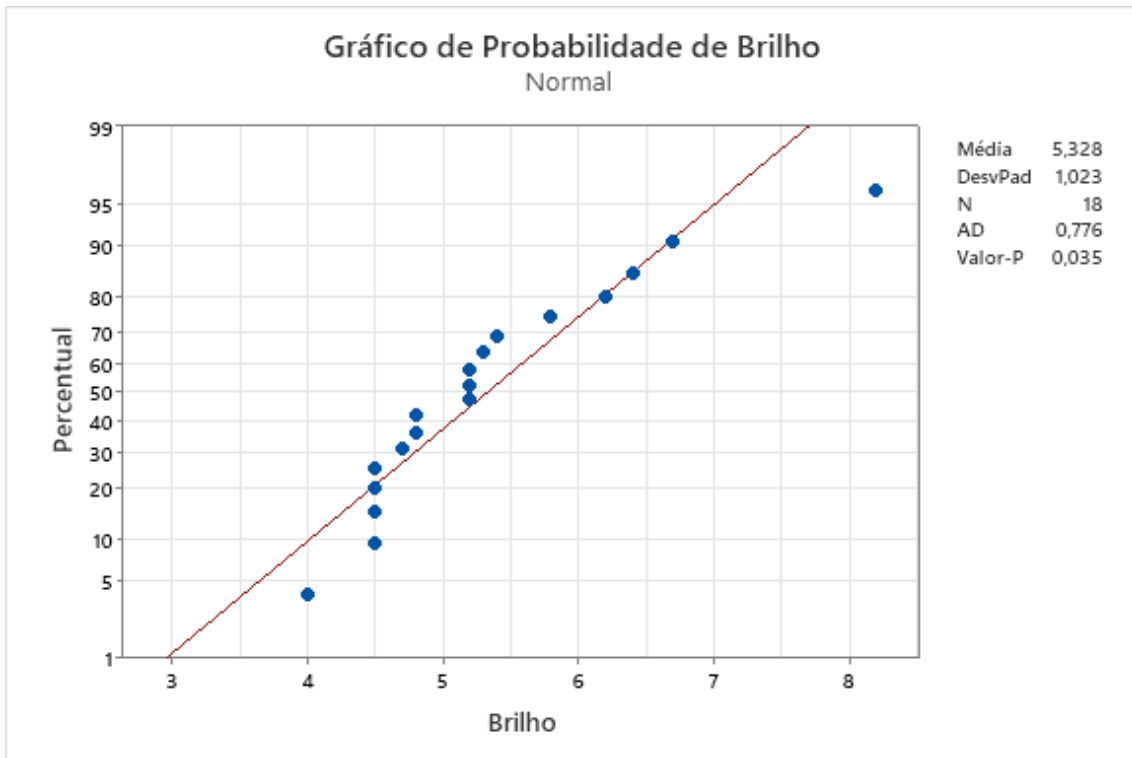


Figura F. 1 Teste de normalidade dos resíduos para o produto F.

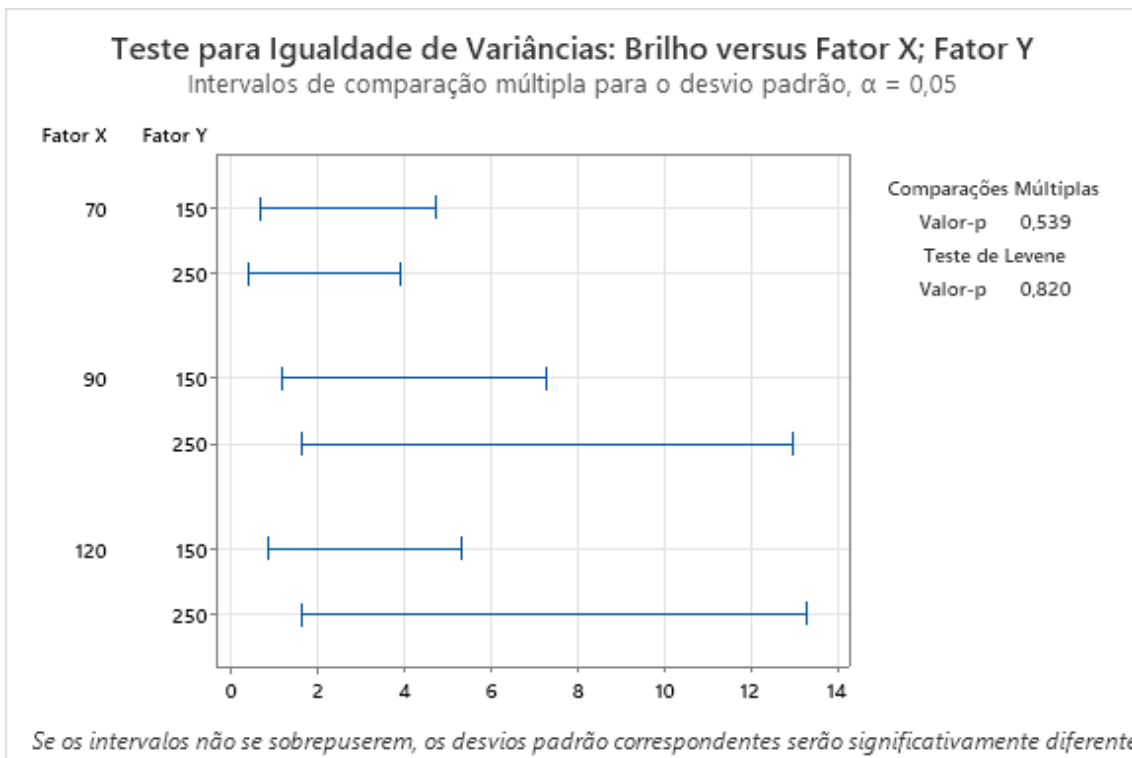


Figura F. 2 Teste de igualdade de variâncias para o produto F.

Método	GL	Valor H	Valor-p
Não ajustado para empates	6	12,78	0,047
Ajustado para empates	6	12,92	0,044

Figura F. 3 Resultado do teste de Kruskal-Wallis para o produto F.

Equação de Regressão

$$\text{Brilho} = 3,572 - 0,00438 \text{ Fator Y} + 0,000141 \text{ Fator X} * \text{Fator Y}$$

Coefficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	3,572	0,705	5,07	0,000	
Fator Y	-0,00438	0,00509	-0,86	0,402	2,21
Fator X*Fator Y	0,000141	0,000040	3,50	0,003	2,21

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,725045	55,64%	49,73%	35,23%

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	2	9,8908	4,9454	9,41	0,002
Fator Y	1	0,3907	0,3907	0,74	0,402
Fator X*Fator Y	1	6,4235	6,4235	12,22	0,003
Erro	15	7,8854	0,5257		
Falta de ajuste	3	1,8320	0,6107	1,21	0,348
Erro puro	12	6,0533	0,5044	*	*
Total	17	17,7761			

Figura F. 4 Análise da regressão para o produto F.

Anexo G - Resultados relativos ao produto G

Tabela G. 1 Valores do brilho obtidos para as diferentes combinações e respetivas espessuras, para o produto G.

Combinação	Espessura (μm)	Brilho (UB)
90.250.1,9	73,7	6,2
90.250.1,9	97,0	5,0
90.250.1,9	70,3	7,2
90.150.1,9	79,7	4,0
90.150.1,9	84,7	4,4
90.150.1,9	68,3	3,6
70.150.1,9	92,7	3,9
70.150.1,9	94,3	3,7
70.150.1,9	62,3	4,1
70.250.1,9	75,7	4,6
70.250.1,9	74,3	4,0
70.250.1,9	55,7	4,2
120.250.1,9	71,7	6,4
120.250.1,9	70,3	7,3
120.250.1,9	80,7	6,3
120.150.1,9	83,3	4,8
120.150.1,9	95,0	5,4
120.150.1,9	72,7	6,3

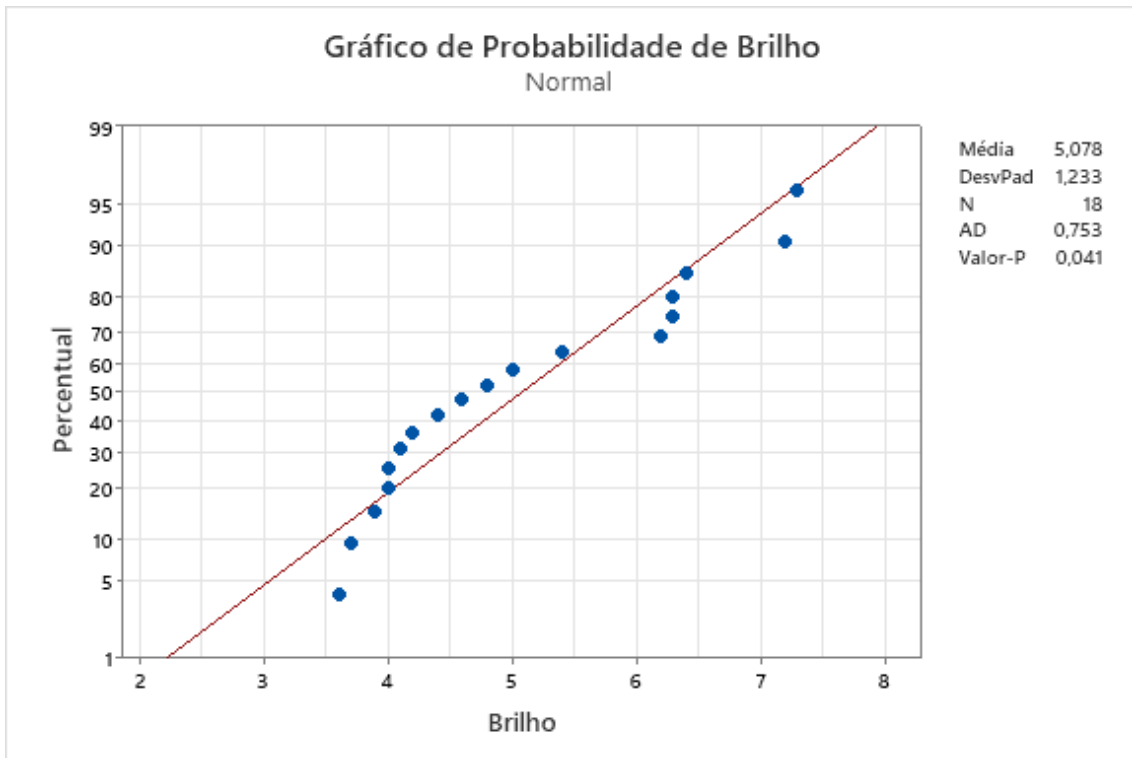


Figura G. 1 Teste de normalidade dos resíduos para o produto G.

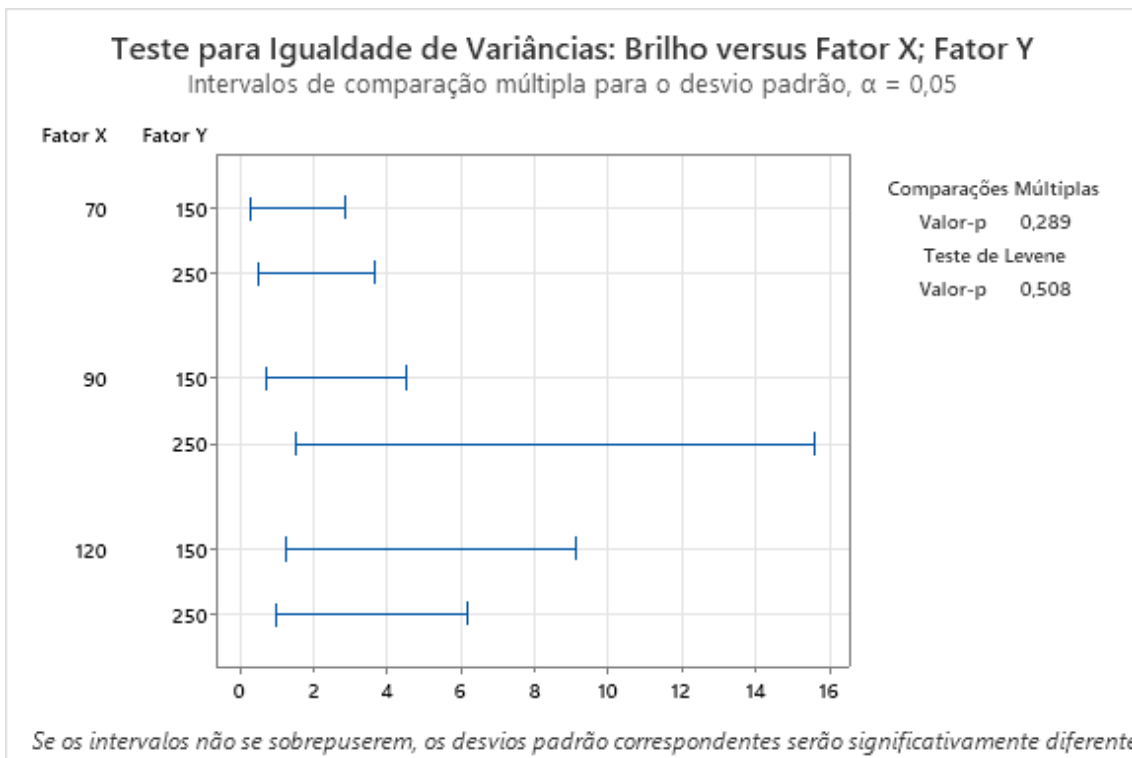


Figura G. 2 Teste de igualdade de variâncias para o produto G.

Método	GL	Valor H	Valor-p
Não ajustado para empates	6	16,80	0,010
Ajustado para empates	6	16,86	0,010

Figura G. 3 Resultado do teste de Kruskal-Wallis para o produto G.

Equação de Regressão

Brilho = -1,05 + 0,03952 Fator X + 0,01222 Fator Y

Coeficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	-1,05	1,00	-1,05	0,310	
Fator X	0,03952	0,00797	4,96	0,000	1,00
Fator Y	0,01222	0,00328	3,73	0,002	1,00

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,694764	71,97%	68,23%	61,05%

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	2	18,591	9,2953	19,26	0,000
Fator X	1	11,868	11,8684	24,59	0,000
Fator Y	1	6,722	6,7222	13,93	0,002
Erro	15	7,240	0,4827		
Falta de ajuste	3	2,480	0,8268	2,08	0,156
Erro puro	12	4,760	0,3967	*	*
Total	17	25,831			

Figura G. 4 Análise da regressão do produto G.

Anexo H - Resultados relativos ao produto H

Tabela H. 1 Valores do brilho obtidos para as diferentes combinações e respetivas espessuras, para o produto H.

Combinação	Espessura (μm)	Brilho (UB)
90.250.2,3	89,0	6,1
90.250.2,3	73,3	6,6
90.250.2,3	85,0	7,0
90.150.2,3	92,7	7,1
90.150.2,3	80,3	7,8
90.150.2,3	80,3	8,0
120.250.2,3	79,7	9,0
120.250.2,3	82,3	8,2
120.250.2,3	83,3	8,3
120.150.2,3	93,3	12,0
120.150.2,3	78,7	7,3
120.150.2,3	81,7	8,8

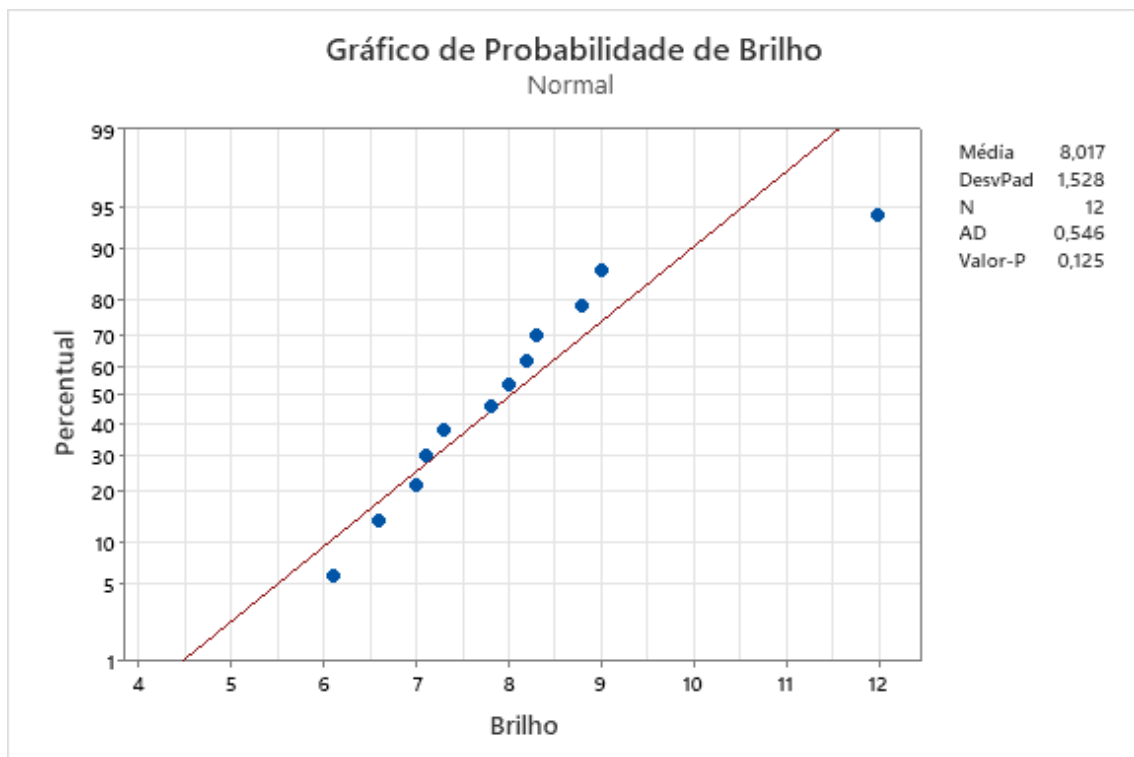


Figura H. Teste de normalidade dos resíduos para o produto H.

Teste para Igualdade de Variâncias: Brilho versus Fator X; Fator Y

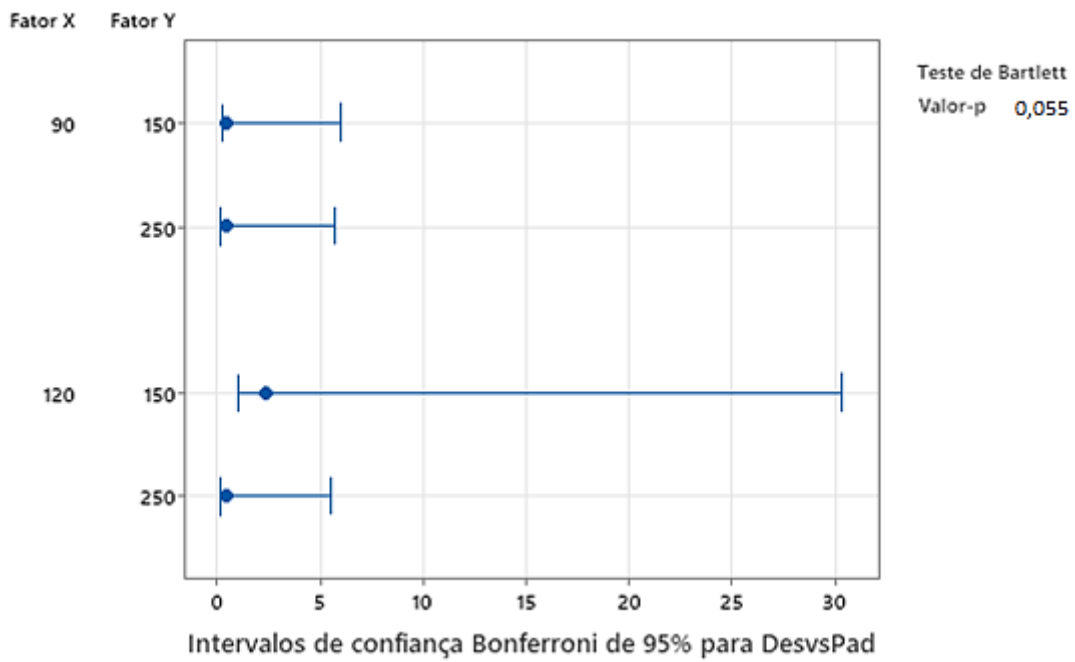


Figura H. 1 Teste de igualdade de variâncias para o produto H.

Equação de Regressão

$$\text{Brilho} = 3,53 + 0,0611 \text{ Fator X} - 0,00967 \text{ Fator Y}$$

Coeficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	3,53	2,80	1,26	0,238	
Fator X	0,0611	0,0229	2,66	0,026	1,00
Fator Y	-0,00967	0,00688	-1,40	0,194	1,00

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
1,19210	50,19%	39,12%	11,45%

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	2	12,8867	6,4433	4,53	0,043
Fator X	1	10,0833	10,0833	7,10	0,026
Fator Y	1	2,8033	2,8033	1,97	0,194
Erro	9	12,7900	1,4211		
Falta de ajuste	1	0,0300	0,0300	0,02	0,894
Erro puro	8	12,7600	1,5950	*	*
Total	11	25,6767			

Figura H. 2 Análise da regressão do produto H.

Anexo I - Resultados relativos ao produto I

Tabela I. 1 Valores do brilho obtidos para as diferentes combinações e respetivas espessuras, para o produto I.

Combinação	Espessura (μm)	Brilho (UB)
90.250.2,3	62,3	9,1
90.250.2,3	69,0	6,5
90.250.2,3	65,3	8,0
90.150.2,3	53,2	8,3
90.150.2,3	73,0	7,0
90.150.2,3	68,3	6,5
70.150.2,3	86,0	5,2
70.150.2,3	65,0	5,7
70.150.2,3	81,0	5,0
70.250.2,3	90,7	5,4
70.250.2,3	97,3	6,0
70.250.2,3	69,7	7,3
120.250.2,3	50,7	5,9
120.250.2,3	96,0	6,2
120.250.2,3	101,7	6,8
120.150.2,3	64,0	8,2
120.150.2,3	66,7	6,5
120.150.2,3	73,3	6,5

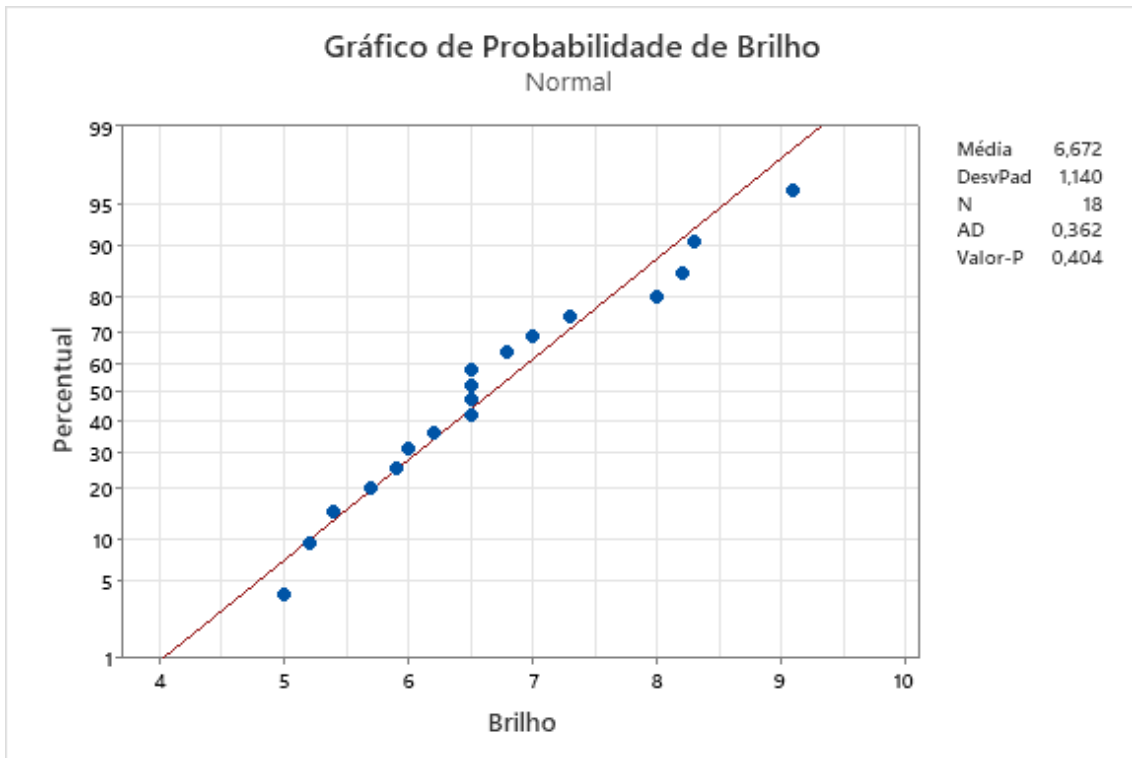


Figura I. 1 Teste de normalidade dos resíduos para o produto I.

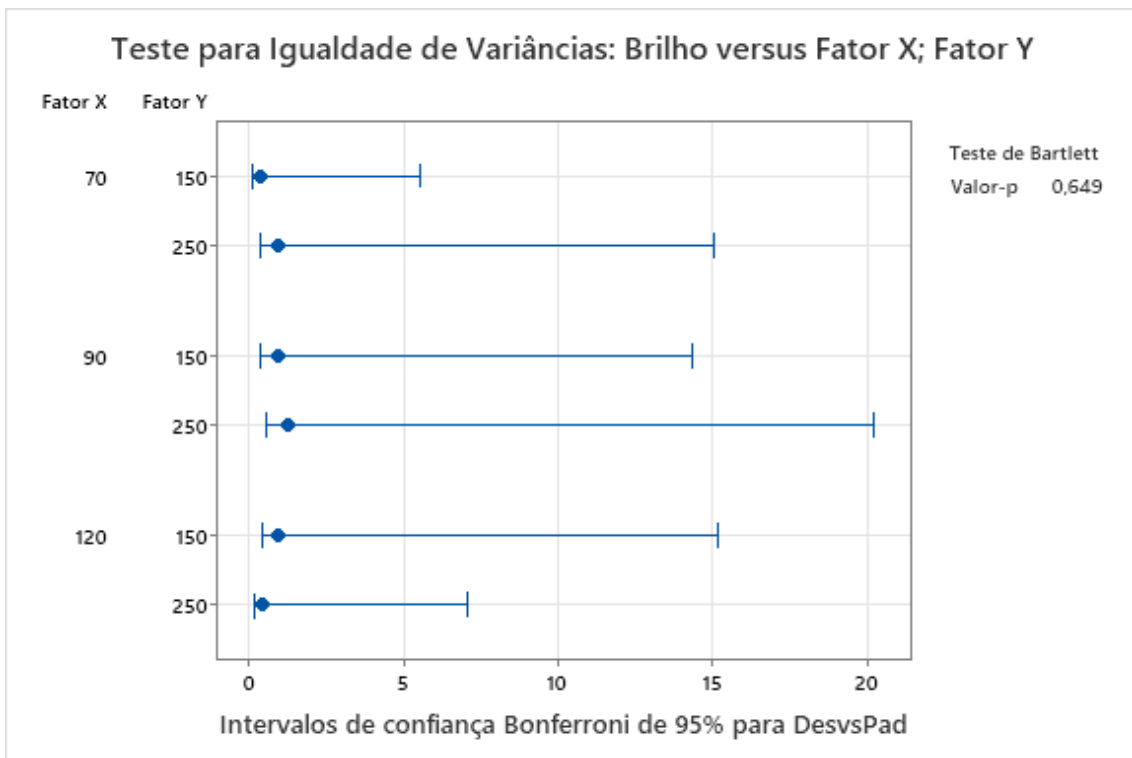


Figura I. 2 Teste de igualdade de variâncias para o produto I.

Equação de Regressão

$$\text{Brilho} = -22,61 + 0,542 \text{ Fator X} + 0,0351 \text{ Fator Y} - 0,002389 \text{ Fator X} \times \text{Fator X} \\ - 0,000349 \text{ Fator X} \times \text{Fator Y}$$

Coeficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	-22,61	7,46	-3,03	0,010	
Fator X	0,542	0,145	3,74	0,002	213,29
Fator Y	0,0351	0,0190	1,85	0,087	21,63
Fator X*Fator X	-0,002389	0,000726	-3,29	0,006	197,29
Fator X*Fator Y	-0,000349	0,000199	-1,76	0,102	37,63

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,865815	55,86%	42,27%	18,25%

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	4	12,3308	3,0827	4,11	0,023
Fator X	1	10,4693	10,4693	13,97	0,002
Fator Y	1	2,5688	2,5688	3,43	0,087
Fator X*Fator X	1	8,1096	8,1096	10,82	0,006
Fator X*Fator Y	1	2,3158	2,3158	3,09	0,102
Erro	13	9,7453	0,7496		
Falta de ajuste	1	0,1186	0,1186	0,15	0,707
Erro puro	12	9,6267	0,8022	*	*
Total	17	22,0761			

Figura I. 3 Análise da regressão do produto I.

Anexo J - Resultados relativos ao produto J

Tabela J. 1 Valores do brilho obtidos para as diferentes combinações e respectivas espessuras, para o produto J.

Combinação	Espessura (μm)	Brilho (UB)
90.250.2,3	93,0	10,8
90.250.2,3	81,3	11,3
90.250.2,3	90,0	7,5
90.150.2,3	97,7	8,1
90.150.2,3	51,7	12,7
90.150.2,3	57,7	13,0
70.150.2,3	78,0	12,9
70.150.2,3	75,7	10,4
70.150.2,3	97,7	11,1
70.250.2,3	84,0	7,9
70.250.2,3	76,7	9,7
70.250.2,3	75,3	8,8
120.250.2,3	83,3	10,3
120.250.2,3	81,3	11,8
120.250.2,3	71,3	10,5
120.150.2,3	73,7	10,5
120.150.2,3	65,7	12,5
120.150.2,3	89,0	14,8

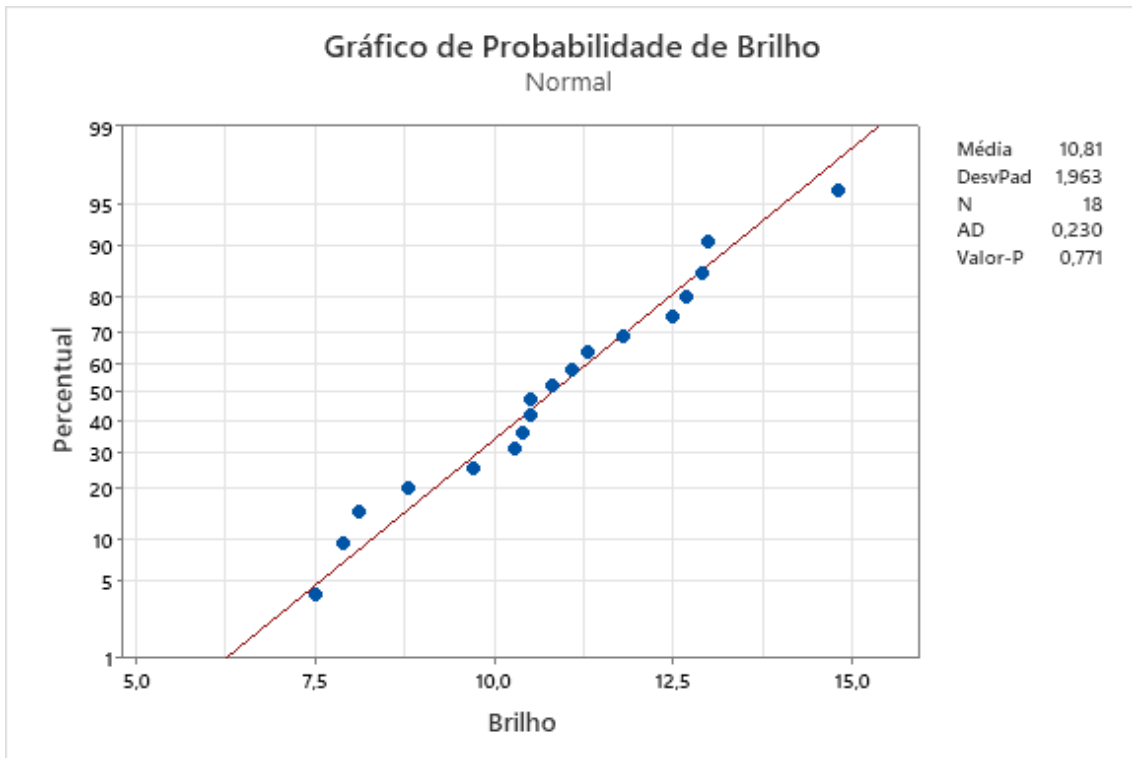


Figura J. 1 Teste de normalidade dos resíduos para o produto J.

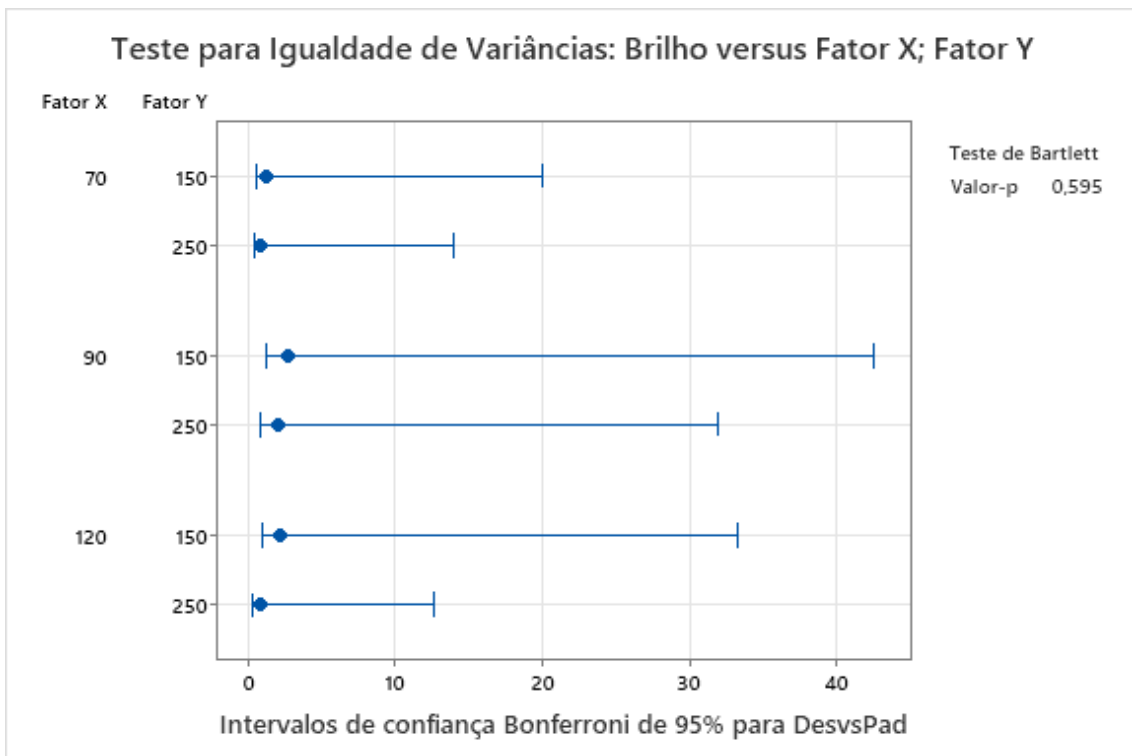


Figura J. 2 Teste de igualdade de variâncias para o produto J.

Equação de Regressão

$$\text{Brilho} = 14,68 - 0,0345 \text{ Fator Y} + 0,000163 \text{ Fator X} * \text{Fator Y}$$

Coeficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	14,68	1,59	9,24	0,000	
Fator Y	-0,0345	0,0115	-3,01	0,009	2,21
Fator X*Fator Y	0,000163	0,000091	1,79	0,094	2,21

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
1,63509	38,75%	30,59%	17,59%

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	2	25,3750	12,6875	4,75	0,025
Fator Y	1	24,2283	24,2283	9,06	0,009
Fator X*Fator Y	1	8,5550	8,5550	3,20	0,094
Erro	15	40,1028	2,6735		
Falta de ajuste	3	0,9561	0,3187	0,10	0,960
Erro puro	12	39,1467	3,2622	*	*
Total	17	65,4778			

Figura J. 3 Análise da regressão do produto J.

Anexo K - Resultados relativos ao produto K

Tabela K. 1 Valores do brilho obtidos para as diferentes combinações e respectivas espessuras, para o produto K.

Combinação	Espessura (μm)	Brilho (UB)
90.250.2,3	78,6	5,6
90.250.2,3	80,3	5,7
90.250.2,3	84,0	4,4
90.150.2,3	74,7	4,6
90.150.2,3	87,3	4,5
90.150.2,3	83,3	3,8
120.250.2,3	83,7	5,0
120.250.2,3	92,7	4,4
120.250.2,3	86,0	7,0
120.150.2,3	88,0	6,7
120.150.2,3	73,3	5,8
120.150.2,3	83,7	6,2

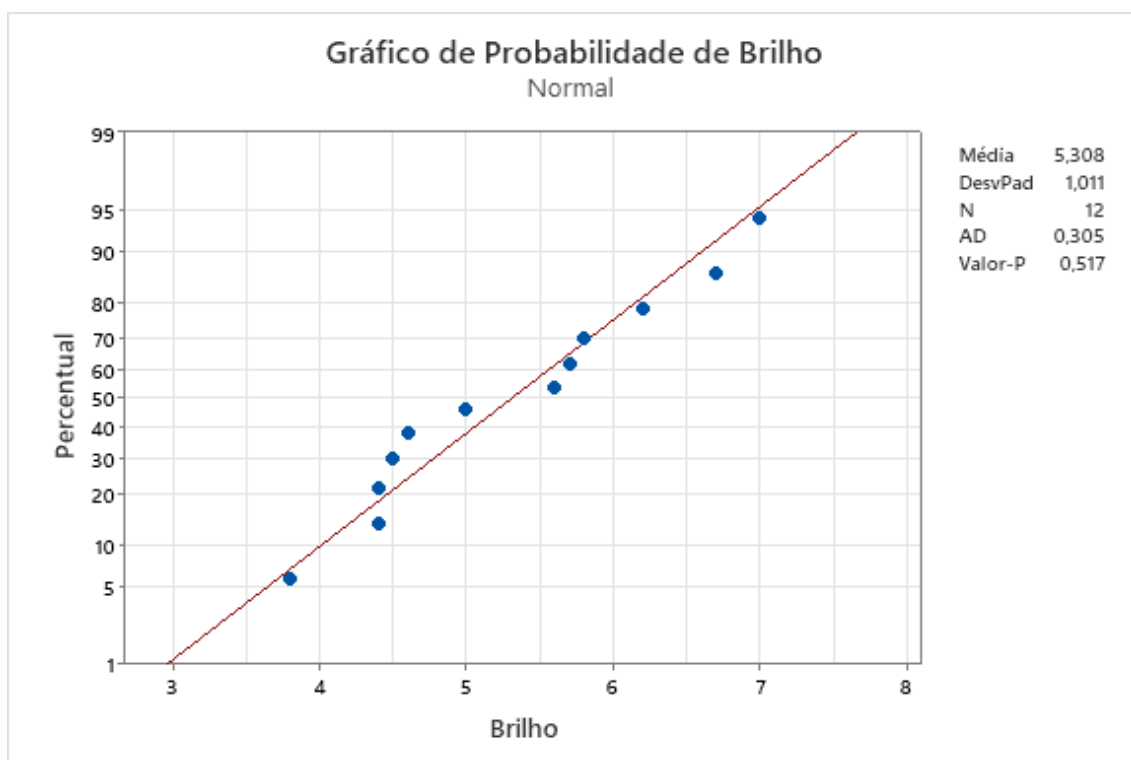


Figura K. 1 Teste de normalidade dos resíduos para o produto K.

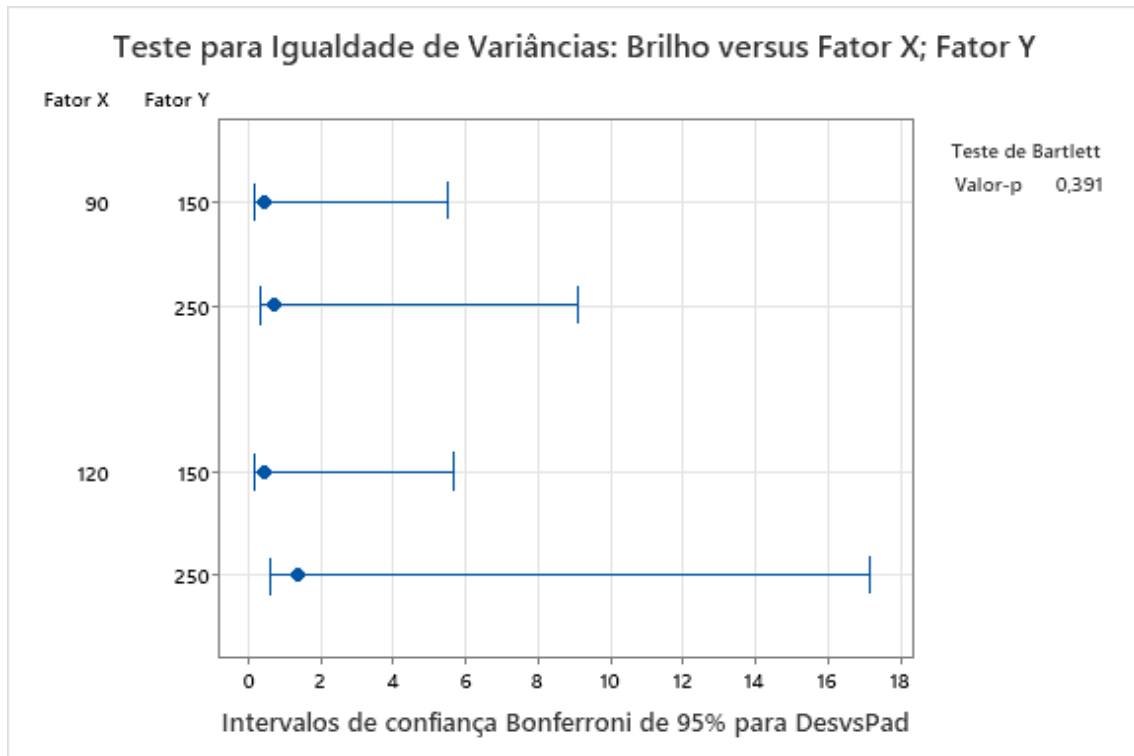


Figura K. 2 Teste de igualdade de variâncias para o produto K.

Equação de Regressão

$$\text{Brilho} = -10,55 + 0,1494 \text{ Fator X} + 0,0603 \text{ Fator Y} - 0,000567 \text{ Fator X} \times \text{Fator Y}$$

Coeficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	-10,55	7,00	-1,51	0,170	
Fator X	0,1494	0,0660	2,26	0,053	17,00
Fator Y	0,0603	0,0340	1,78	0,114	50,00
Fator X*Fator Y	-0,000567	0,000320	-1,77	0,115	66,00

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,832166	50,75%	32,28%	0,00%

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	3	5,709	1,9031	2,75	0,112
Fator X	1	3,547	3,5471	5,12	0,053
Fator Y	1	2,184	2,1841	3,15	0,114
Fator X*Fator Y	1	2,167	2,1675	3,13	0,115
Erro	8	5,540	0,6925		
Total	11	11,249			

Figura K. 3 Análise da regressão do produto K.

Anexo L – Estudo da repetibilidade

Tabela L. 1 Valores obtidos para o estudo da repetibilidade de um produto liso.

Amostra	Espessura (μm)	Brilho (UB)	Brilho médio \pm Desvio Padrão (UB)	Erro relativo (%)	Erro relativo Médio (%)
1	115,2	82,0	82,7 \pm 0,5	0,00	0,88
2	113,0	83,2		1,46	
3	95,7	83,0		1,22	
4	73,7	82,4		0,49	
5	69,3	83,0		1,22	

Tabela L. 2 Valores obtidos para o estudo da repetibilidade de um produto poliéster texturado.

Amostra	Espessura (μm)	Brilho (UB)	Brilho médio \pm Desvio Padrão (UB)	Erro relativo (%)	Erro relativo Médio (%)
1	82,3	5,6	7,0 \pm 1,2	46,15	32,7
2	83,3	5,9		43,27	
3	78,7	7,8		25,00	
4	72,7	9,5		8,65	
5	73,7	7,3		29,81	
6	72,0	7,7		25,96	
7	75,0	6,9		33,65	
8	76,3	7,2		30,77	
9	86,0	5,3		49,04	
10	73,7	6,8		34,62	