

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**OTÁVIO AUGUSTO MACHADO BRASIL**

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS DE UM MOINHO CLASSIFICADOR  
DE IMPACTO NA DETERMINAÇÃO DE GRANULOMETRIA DE TINTA EM PÓ**

**PONTA GROSSA**

**2022**

**OTÁVIO AUGUSTO MACHADO BRASIL**

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS DE UM MOINHO CLASSIFICADOR  
DE IMPACTO NA DETERMINAÇÃO DE GRANULOMETRIA DE TINTA EM PÓ**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Química da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador(a): Maria Regina Parise  
Coorientador(a): Claudio Rodrigues Martins

**PONTA GROSSA**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**OTÁVIO AUGUSTO MACHADO BRASIL**

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS DE UM MOINHO CLASSIFICADOR  
DE IMPACTO NA DETERMINAÇÃO DE GRANULOMETRIA DE TINTA EM PÓ**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Química da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 22/junho/2022

---

Jhon Jairo Ramirez Behainne (Presidente – Substituto)  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Erica Roberta Lovo da Rocha Watanabe (Membro)  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Giane Gonçalves Lenzi (Membro)  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PONTA GROSSA**

**2022**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais, Antônio e Maria Brasil, e a toda minha família pelo suporte durante minha trajetória acadêmica. Eles que sempre me incentivaram a seguir em frente com os melhores conselhos e todo apoio possível.

Gostaria de agradecer à minha cónjuge Mariel Hang de Oliveira por estar ao meu lado durante todo o curso, nos momentos de entretenimento e estudos, primeiramente como uma boa amiga e, ao final, como minha companheira.

Não posso esquecer de agradecer a UTFPR-PG e a todos os professores que me ensinaram a ser o profissional que sou hoje. Aos meus amigos, que ao longo da universidade proporcionaram muitos bons momentos, deixo também meus sinceros agradecimentos.

À professora Maria Regina Parise e ao professor Jhon Jairo Ramirez Behainne deixo um agradecimento especial – ambos excelentes pessoas e profissionais com quem tive a oportunidade de explorar mais a fundo a área da pesquisa.

Por último, agradeço a equipe do Grupo WEG por apostar nas minhas capacidades e me conceder a oportunidade de trabalhar ao lado de grandes profissionais, visando o desenvolvimento da indústria e de toda a sociedade que com ela se beneficia. Eis a síntese do labor e esforço de todos os professores que contribuíram com a minha formação.

*Perfection of means and confusion of goals seem  
– in my opinion – to characterize our age  
(EINSTEIN, 1941).*

Perfeição dos meios e confusão de objetivos  
parecem – na minha opinião – caracterizar a  
nossa época  
(EINSTEIN, 1941).

## RESUMO

A procura de tintas em pó no mercado global vem crescendo, gerando uma necessidade por parte dos fabricantes de aprimorar as tecnologias de produção da tinta, a fim de garantir ao consumidor uma melhor qualidade nos produtos e maior competitividade de mercado. O processo de fabricação de uma tinta em pó convencional envolve, em resumo, três etapas – a pré-mistura das matérias-primas, a extrusão e a micronização. A fase de micronização garante o aspecto de pó à tinta, sendo a granulometria um dos parâmetros-chave para a boa aplicação e aparência do recobrimento. Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo explorar a ação dos diferentes parâmetros de um moinho classificador de impacto (ICM) sobre a granulometria da tinta em pó. Utilizando-se de métodos estatísticos como OFAT, ANOVA e DOE, concluiu-se que os parâmetros de abertura da tela da peneira, rotações do classificador, do disco de moagem e da dosagem de fluidizante são os mais críticos na determinação do  $d_{50}$  (diâmetro da partícula para o qual metade da amostra é mais fino) do produto. Propôs-se uma equação correlacionando os parâmetros críticos e  $d_{50}$ , limitada à configuração do sistema de moagem e ao produto testado nos experimentos. Validou-se posteriormente essa equação em outra data, afirmando a robustez dos coeficientes obtidos.

Palavras-chave: análise de variância; planejamento de experimentos; micronização.

## ABSTRACT

The search of powder coatings in the global market has been growing, generating a need on the part of manufacturers to improve paint production technologies, in order to guarantee the consumer a better quality in the products and greater market competitiveness. The manufacturing process of a conventional powder coating involves, in short, three steps – the pre-mixing of raw materials, extrusion and micronization. The micronization phase guarantees the powdery appearance of the coating, with granulometry being one of the key parameters for good application and appearance of the coating. The present work aims to explore the influence of different parameters of an impact classifier mill (ICM) on the particle size of the powder coating. Using statistical methods such as OFAT, ANOVA and DOE, it was concluded that the parameters of sieve opening, classifier rotation, grinding disc rotation and fluidizer dosage are the most critical in determining the  $d_{50}$  (diameter of the particle that half of the sample is finer) of the product. An equation correlating the critical parameters and the  $d_{50}$  was proposed, limited to the configuration of the milling system and product tested in the experiments. This equation was later validated on another date, confirming the robustness of the coefficients obtained.

Keywords: analysis of variance; design of experiments; micronization

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Pintura com leito fluidizado.....	15
Figura 2 - Pulverização eletroestática .....	16
Figura 3 - Processo de extrusão.....	18
Figura 4 - Processo de fabricação de tintas em pó .....	18
Figura 5 - Aplicação de tinta em pó com aspecto de casca de laranja .....	19
Figura 6 - Distribuição granulométrica de tinta em pó.....	20
Figura 7 - Moinho classificador de impacto.....	22
Figura 8 - Classificação das partículas .....	23
Figura 9 - Diagrama FRD com terminologias do método DOE .....	24
Figura 10 - Comparação entre dados no diagrama DOE e na <i>Variability Chart</i> .....	26
Figura 11 – Análise por processos de usinagem .....	27
Figura 12 - Análise por centros de trabalho.....	27
Figura 13 - Análise por lotes de material.....	28
Figura 14 - Diagrama FRD do experimento .....	31
Figura 15 - <i>Variability chart</i> do experimento .....	32
Figura 16 - Análise de variância do experimento .....	33
Figura 17 - Médias dos valores de granulometria dos experimentos .....	34
Figura 18 - Pareto dos fatores e interações .....	34
Figura 19 - Análise dos fatores críticos na granulometria .....	35
Figura 20 - Comparação entre os valores experimentais e os valores calculados matematicamente .....	36
Figura 21 - Análise de regressão bivariada.....	37
Figura 22 - <i>Variability chart</i> da validação .....	38
Figura 23 - Desvio padrão médio das configurações .....	39



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 - Fatores e níveis utilizados no experimento .....</b>	<b>30</b>
<b>Tabela 2 - Configurações avaliadas nos testes .....</b>	<b>38</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	Método de Análise de Variância
DOE	<i>Design of Experiments</i> ou Planejamento de Experimentos
FDR	Diagrama de Relação dos Fatores
ICM	Moinhos Classificadores de Impacto
LIE	Limite Inferior de Especificação
LSE	Limite Superior de Especificação
OFAT	<i>One-factor-at-a-time</i> ou Um Fator de Cada Vez
PVC	Policloreto de vinila
UCL	<i>Upper Control Level</i> ou Limite Superior de Controle

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu\text{m}$	Micrómetro
$\text{m/s}$	Metros por segundo
$\text{m}^3/\text{min}$	Metros cúbicos por minuto
$\text{m}^3/\text{s}$	Metros cúbicos por segundo
RPM	Rotações por minuto
$\text{s}^{-1}$	Segundo elevado a menos um

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>14</b>
<b>3.1</b>	<b>Tintas em Pó.....</b>	<b>14</b>
3.1.1	Caracterização, aplicação e análise de mercado.....	14
3.1.2	Processo produtivo.....	17
<b>3.2</b>	<b>Granulometria de tintas em pó.....</b>	<b>19</b>
<b>3.3</b>	<b>Sistemas de moagem e Moinhos Classificadores de Impacto (ICM)</b> <b>21</b>	
<b>3.4</b>	<b>Métodos de experimentação .....</b>	<b>23</b>
<b>3.5</b>	<b>Métodos de análise de dados.....</b>	<b>26</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>29</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>31</b>
<b>5.1</b>	<b>OFAT do tempo de coleta da amostra .....</b>	<b>31</b>
<b>5.2</b>	<b>ANOVA .....</b>	<b>32</b>
<b>5.3</b>	<b>DOE .....</b>	<b>33</b>
<b>5.4</b>	<b>Validação posterior .....</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>40</b>
<b>8</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>42</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Tintas em pó são produtos produzidos por meio da combinação de resinas termoplásticas e/ou termofixas juntamente com endurecedores, pigmentos e outros aditivos. Elas podem ser aplicadas sobre superfícies a fim de conferir uma cobertura na forma de filme plástico. Essa aplicação ocorre majoritariamente de duas maneiras: através de leito fluidizado, ou por pulverização eletroestática.

No processo por leito fluidizado, a tinta em pó é colocada dentro de um equipamento onde irá receber vazões de ar até que obtenha características de fluido. A peça a ser coberta é pré-aquecida e, quando entra em contato com a tinta, ela a derrete formando uma cobertura contínua. Já no processo de aplicação empregando pulverização eletroestática, a tinta em pó é dispersada no ar passando por uma corrente elétrica que lhe confere carga. Dessa forma, as partículas são atraídas e depositadas na superfície do material a ser coberto que, em seguida, é colocado em uma estufa que fará a fusão da tinta formando a cobertura (MARK, 2014).

Para a fabricação das tintas em pó, são necessárias três etapas principais: a pré-mistura, a extrusão e a micronização. Na primeira etapa todas as matérias-primas necessárias são misturadas até que se forme uma mistura em pó macroscopicamente uniforme. Em seguida, essa mistura segue para uma extrusora que irá dispersar todos os elementos em uma pasta plástica, que depois será arrefecida entre rolos até se tornar pequenas chapas sólidas. Essas chapas serão micronizadas em um moinho a fim de apresentarem um diâmetro de partícula entre 30 – 50  $\mu\text{m}$  (SANCHES, 2011).

O tamanho das partículas é extremamente importante no que tange as tintas em pó devido a sua natureza e forma de aplicação. Partículas muito grandes podem modificar a aparência final do filme, enquanto partículas muito pequenas podem gerar baixa fluidez e formação de aglomerados. Dessa forma, se faz necessário um controle da distribuição granulométrica das partículas após o processo de moagem e também o conhecimento de quais fatores influenciam nesse processo.

Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo responder quais os parâmetros de moagem que influenciam no tamanho das partículas de tinta em pó e como otimizar esses parâmetros para um melhor aproveitamento do processo.

A fim de responder a esse questionamento, foram realizados experimentos industriais com diferentes configurações do processo de moagem. Os dados coletados foram analisados e comparados por meio de métodos estatísticos, sendo

proposta uma expressão matemática que pudesse otimizar o processo. Posteriormente, foram conduzidos mais experimentos a fim de validar a expressão obtida.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Estudar o efeito dos diferentes fatores de controle na micronização de um sistema de moagem por um moinho classificador de impacto no que tange a determinação da granulometria de tinta em pó.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Elencar os fatores do sistema que influenciam na granulometria do produto;
- Planejar os experimentos que testam esses fatores de forma controlada;
- Realizar os experimentos e coletar os dados;
- Analisar os dados e propor uma equação preditiva envolvendo os fatores, interações e a granulometria.

## **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **3.1 Tintas em Pó**

#### **3.1.1 Caracterização, aplicação e análise de mercado**

Tintas em pó têm como base resinas termoplásticas e/ou termofixas associadas com pigmentos, endurecedores e outros aditivos. Esses polímeros possuem a capacidade de serem moldados em altas temperaturas, e por isso, são misturados com os outros componentes por meio de um processo de extrusão que fundem e dispersam todos os elementos em um único produto. Após o endurecimento do filme via resfriamento e quebra em *chips* grosseiros, ocorre a redução a um pó fino no processo de moagem.

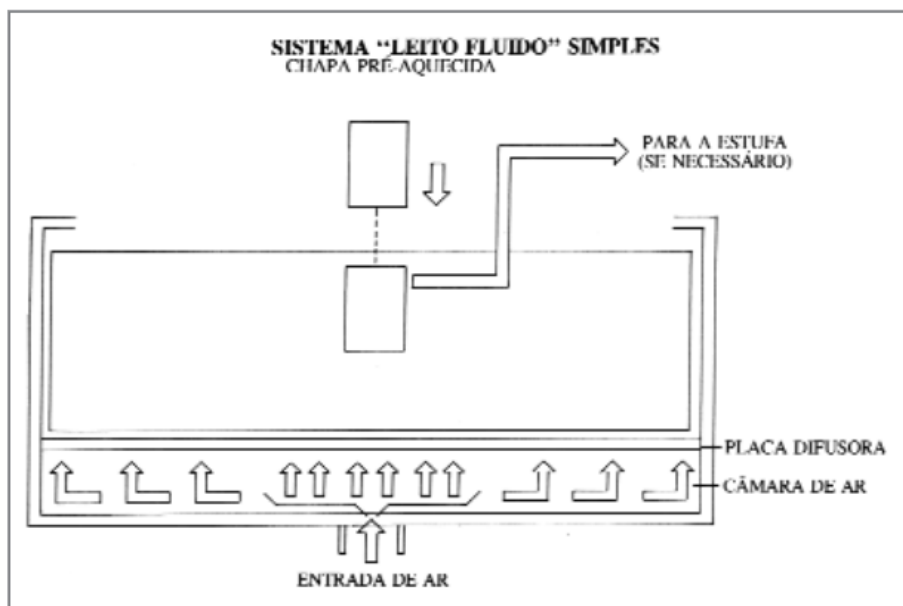
As resinas utilizadas nesse processo são polímeros de alto peso molecular, responsáveis por criar a película plástica que irá recobrir a peça/substrato, bem como

a maioria das propriedades dessa cobertura como, por exemplo, brilho, resistência química, entre outros. Para que o polímero endureça é necessário um agente de cura (ou endurecedor) que determina o tipo de estrutura polimérica que será formada, o grau de ligações cruzadas e as resistências químicas e mecânicas do filme (MIRANDA, 2010)

Além desse componente, ainda são adicionados os pigmentos, que são substâncias insolúveis capazes de conferir cor e opacidade a tinta e as cargas, substâncias inorgânicas para dar “corpo” a tinta conferindo características como dureza e controle de brilho. Em alguns casos pode ser necessária a inclusão de mais aditivos ao produto dependendo da sua aplicação final. Os aditivos podem conferir brilho, alastramento, aderência, resistência ao risco, entre outras propriedades (MIRANDA, 2010)

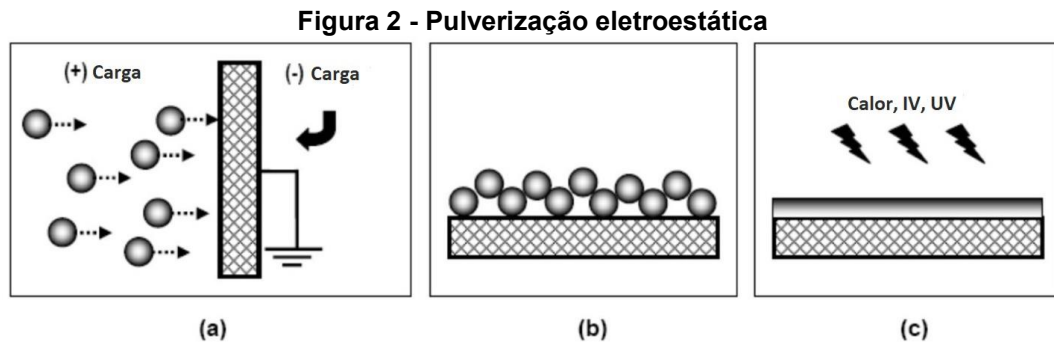
A aplicação de tintas em pó em superfícies pode ser realizada de duas maneiras: através de leito fluidizado, ou por pulverização eletroestática. No processo por leito fluidizado a tinta em pó é colocada em um equipamento contendo uma placa porosa em sua base. Ar passa por essa placa fazendo com que o pó se expanda em volume, adquirindo algumas características de fluido. A peça a ser coberta pela tinta é pré-aquecida até o ponto de fusão do pó e depois é colocada no leito fluidizado, onde as partículas irão derreter em sua superfície formando uma cobertura contínua (MARK, 2014). A figura 1 ilustra esse processo.

**Figura 1 - Pintura com leito fluidizado**



Fonte: EPRISTINA (2016)

Já no processo de aplicação através de pulverização eletrostática, a tinta em pó é dispersada no ar passando por uma corrente elétrica que lhe confere carga. Dessa maneira, as partículas são atraídas e depositadas na superfície do material a ser coberto, este sendo um metal aterrado, em temperatura ambiente (figura 2a). Em seguida, o conjunto é colocado em um forno que fará a fusão da tinta formando uma cobertura contínua (figura 2c) (MARK, 2014).



Fonte: Adaptado de GUTOWSKI (2013)

O mercado mundial de tintas em pó foi avaliado no ano de 2021 em mais de 10 bilhões de dólares e projeta-se que ele tenha um crescimento anual superior a 5,5% durante os próximos 5 anos. A sua produção industrial cresceu nos últimos anos em países asiáticos como China, Coreia do Sul e Índia, devido aos baixos custos de produção nessas regiões. Hoje, os maiores consumidores de tinta em pó são as indústrias automotivas e arquitetônicas, sendo o produto aplicado tanto de maneira decorativa quanto protetiva. (MORDOR INTELLIGENCE, 2022)

Alguns impulsionadores da tinta em pó desde a sua criação são as legislações e discussões ambientais. A tinta em pó é vista como uma tecnologia ecologicamente correta porque não utiliza solventes, compostos orgânicos voláteis são ausentes na maior parte do processo, sistemas de ventilação, filtragem e recuperação de solventes não são necessários, o ar do processo é reciclado e há pouco desperdício, pois, a maior parte do pó dispersado pode ser coletada e reutilizada (MARK, 2014).

Além disso, a tinta em pó também possui valores competitivos com a tinta líquida e possui excelente acabamento, mesmo para mercados exigentes como, por exemplo, o mercado de eletrônicos. Dessa forma, a resposta para a pergunta “por que usar tinta em pó?” pode ser respondida com os “Quatro E's” introduzidos em 1986 por Bocchi e citados por Spyrou (2012):

- Ecologia



- Excelência em acabamento
- Economia
- Energia

Comparando a importância relativa desses fatores, pode-se dizer que, no momento, a alta qualidade e os aspectos econômicos talvez contribuam mais para a aceitação dos revestimentos em pó por seus usuários industriais do que apenas as conformidades regulatórias. No entanto, aliar eficiência com sustentabilidade também é um objetivo projetado por muitas indústrias nos tempos atuais (SPYROU, 2012).

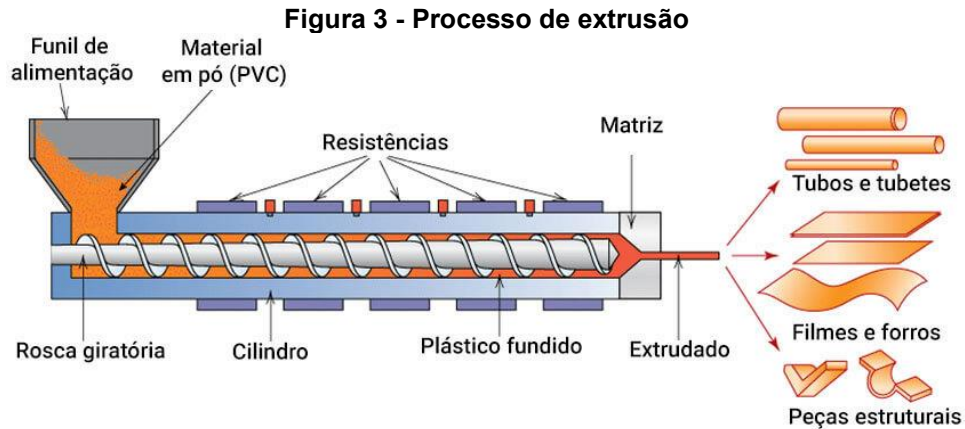
### 3.1.2 Processo produtivo

Os primeiros processos de aplicação de tintas em pó surgiram no final dos anos 40 e consistiam basicamente de pulverização por chama. A mistura em pó era colocada em um aparato que fundia a tinta e a pulverizava, através da propulsão dos gases quentes, no substrato a ser coberto. Já no início dos anos 50, a empresa alemã *Gemmer*, procurando uma maneira mais eficiente de realizar esse processo, conseguiu sucesso na aplicação de PVC em pó em superfícies de metal aquecidas através da técnica de leite fluidizado (MARK, 2014).

Após isso, diversas empresas começaram a testar o método com outros polímeros como polietileno e nylon e ao final dos anos 50, as primeiras tintas em pó começaram a ser lançadas no mercado. Uma das pioneiras nesse segmento foi a empresa britânica *Shell Chemicals* que procurava fabricar coberturas com caráter protetivo para os seus dutos subterrâneos de óleo e gás (SPYROU, 2012).

No entanto, as primeiras tintas em pó apresentavam algumas inconsistências visto que eram apenas uma mistura sólida de pós de resina, pigmentos e endurecedores. Posteriormente, procurou-se misturar previamente resina epóxi líquida com os endurecedores, curar a mistura até obter um material sólido e por fim moe-lo. Apesar de trazer certos avanços, essa técnica apresentava baixa reprodutibilidade e controle de processo (SPYROU, 2012).

Após avanços tecnológicos, a técnica foi sendo aperfeiçoada e, atualmente, utiliza-se o processo de extrusão a fim de misturar todos os componentes da tinta em pó. A extrusora (figura 3) possibilita a mistura gradual dos materiais granulados através da sua compressão juntamente com o aquecimento e fusão térmica.

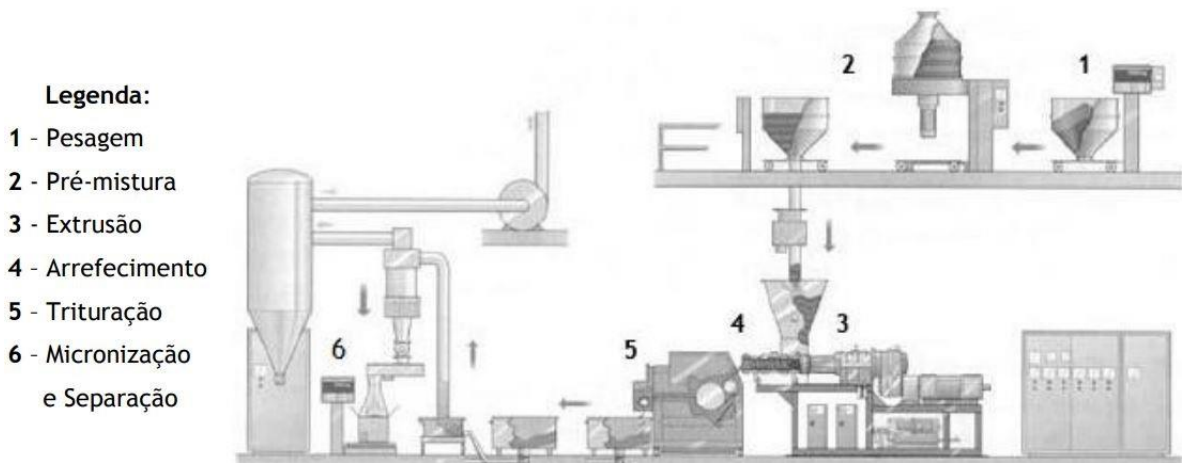


Fonte: Poliforma (2018)

O equipamento é composto por uma ou duas roscas que rotacionam dentro de um cilindro em um processo contínuo. O material é adicionado no funil de alimentação e é transportado através do movimento rotacional por zonas de aquecimento gradual. Ao final do processo todos os compostos já estão fundidos e são então moldados em peças que seguirão para a etapa da moagem (POLIFORMA, 2018)

O processo de fabricação de tinta em pó (figura 4) apresenta três etapas principais: pré-mistura, extrusão e micronização.

**Figura 4 - Processo de fabricação de tintas em pó**



Fonte: Sanches (2011)

Na primeira etapa, as matérias-primas são pesadas [1] e levadas até um pré-misturador onde haverá a homogeneização macroscópica dos componentes [2]. Após esta etapa, a mistura é alimentada em uma extrusora onde, através da compressão e aquecimento gradual, ocorrerá a fusão da resina envelopando os demais componentes [3]. O produto resultante da extrusão é arrefecido entre dois rolos de

metal até solidificar em formato de chapa [4] e em seguida é triturado até formar pastilhas de tinta [5]. Essas pastilhas são levadas até um moinho onde são micronizadas até que apresentem a distribuição granulométrica desejada [6]. Um ciclone é responsável por separar as partículas com dimensões favoráveis, que são então embaladas e seguem para o estoque. (SANCHES, 2011)

### 3.2 Granulometria de tintas em pó

Dada a natureza das tintas em pó, um dos aspectos importantes do material produzido é sua granulometria, ou seja, o tamanho e formato de suas partículas. Caso as partículas não estejam em uma distribuição uniforme, podem ocorrer erros na sua aplicação gerando problemas como a formação de crateras, aspecto de casca de laranja (figura 5) e/ou encolhimento durante a cura (SPYROU, 2012).

**Figura 5 - Aplicação de tinta em pó com aspecto de casca de laranja**



Fonte: IGTEC Brasil (2019)

No decorrer da moagem são produzidas partículas micronizadas de diversos tamanhos e formas. Spyrou (2012) comenta em seu trabalho que, supondo que todas as partículas sejam esféricas e que possuam tamanhos uniformes, haveria 48% de espaços vazios entre elas se estivessem em uma distribuição cúbica. Esse número cairia para 26% caso estivessem em uma distribuição tetraédrica ou piramidal. No entanto, mesmo que fosse possível escolher a melhor distribuição com um determinado tamanho de partícula, ainda haveria 15% espaços de vazios entre elas.

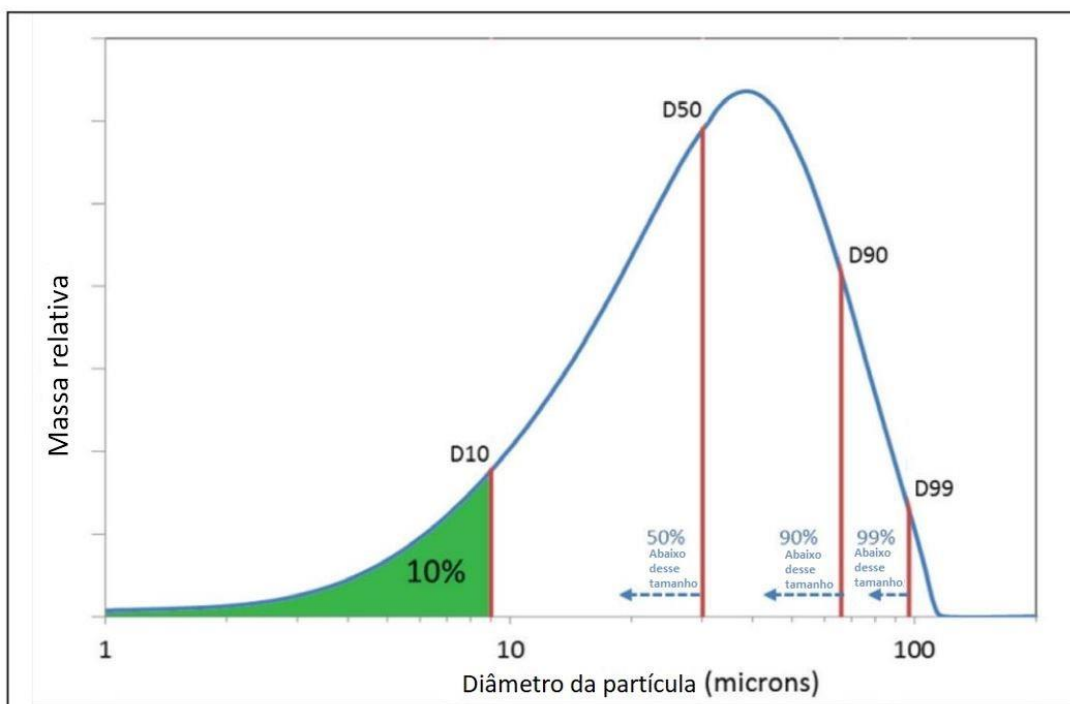
Sendo assim, o que é possível fazer é realizar uma distribuição granulométrica da tinta em pó a fim de separar um intervalo adequado de partículas. Partículas

grandes possuem as vantagens de gerarem um melhor desenvolvimento de textura e de formação de filme. No entanto, caso elas sejam muito grandes, podem modificar a aparência final do filme produzindo, por exemplo, a casca de laranja. Além disso, caso as partículas sejam excepcionalmente grandes poderão cair da peça em que foram aplicadas devido à sua alta relação massa/carga (DIAMOND VOGEL INDUSTRIAL COATING, 2021).

Por outro lado, as partículas pequenas possuem as vantagens de produzirem uma boa cobertura, com uma alta densidade no empacotamento e aparência mais lisa. No entanto, altos níveis de partículas muito pequenas podem levar a uma baixa fluidez e escoamento, uma formação limitada do filme e a criação de aglomerados (DIAMOND VOGEL INDUSTRIAL COATING, 2021).

Para cada tinta em pó produzida, há uma distribuição granulométrica diferenciada dependendo dos aspectos finais pretendidos para a sua aplicação, esta distribuição podendo ser ajustada diretamente conforme os parâmetros de moagem. Uma distribuição geral é a apresentada na figura 6.

**Figura 6 - Distribuição granulométrica de tinta em pó**



Fonte: Adaptado de Diamond Vogel Industrial Coating (2021)

Para esse tipo de distribuição é comum utilizar os parâmetros D10, D50, D90, e D99 que são pontos ao longo da curva correspondentes as porcentagens de

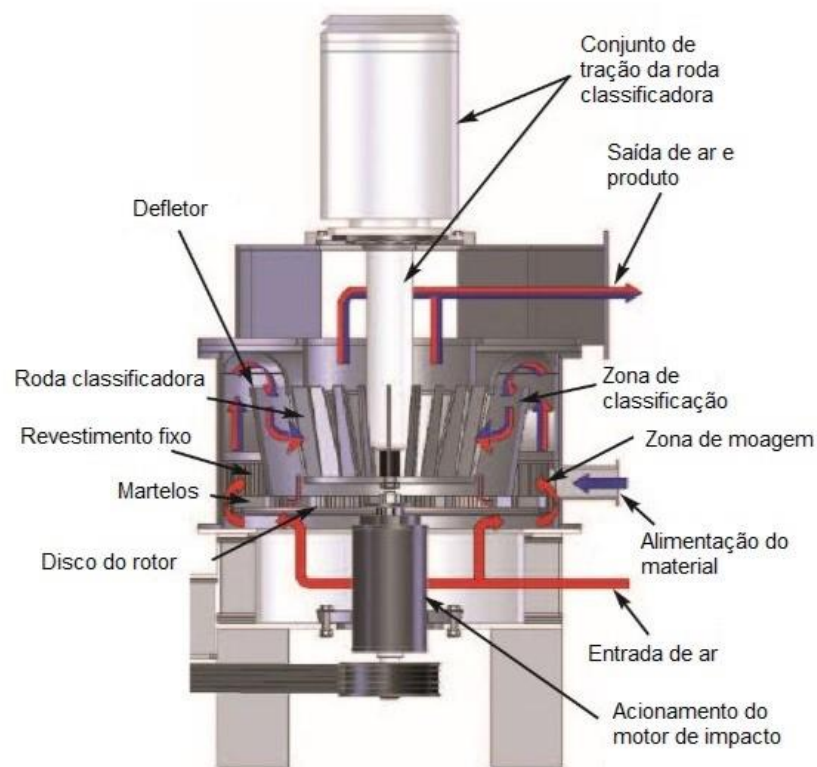
produto. Por exemplo, D10 é o ponto na curva de distribuição no qual 10% das partículas são classificadas e na figura 6 essa parte é evidenciada em verde, sendo D10 corresponde a partículas com diâmetro de 9  $\mu\text{m}$ . Por meio do gráfico também pode-se observar que as partículas favoráveis de tinta em pó possuem um diâmetro maior que 9  $\mu\text{m}$  e menor que 100  $\mu\text{m}$ , tendo um diâmetro médio ótimo entre 30 – 50  $\mu\text{m}$  (DIAMOND VOGEL INDUSTRIAL COATING, 2021; RELOSI, 2016)

### **3.3 Sistemas de moagem e Moinhos Classificadores de Impacto (ICM)**

Após o produto deixar a matriz da extrusora, ser arrefecido e quebrado em pastilhas, ele é geralmente coletado em recipientes móveis e transportado para os moinhos, onde ocorrerá a micronização da tinta em pó. Diferentes tipos de moinhos são usados pelos produtores de tinta em pó, porém todos eles utilizam um processo de atrito em que a redução de tamanho é resultado do impacto dos grânulos sólidos ou lascas com a superfície de moagem ou entre si (SPYROU, 2012).

Os sistemas de moagem contemporâneos apresentam tecnologias combinadas em que, junto da redução das partículas pelo impacto, também há uma classificação dinâmica do tamanho das partículas. Os moinhos classificadores de impacto (ou ICM), por exemplo, utilizam jatos de ar para transportar o material de alimentação para a câmara de moagem dentro do moinho, classificar o material entre frações finas e grossas, recircular as partículas grossas para posterior moagem e transportar as partículas finas para fora do moinho em uma única operação contínua como é mostrado na figura 7 (VOORHEES, 2013).

**Figura 7 - Moinho classificador de impacto**

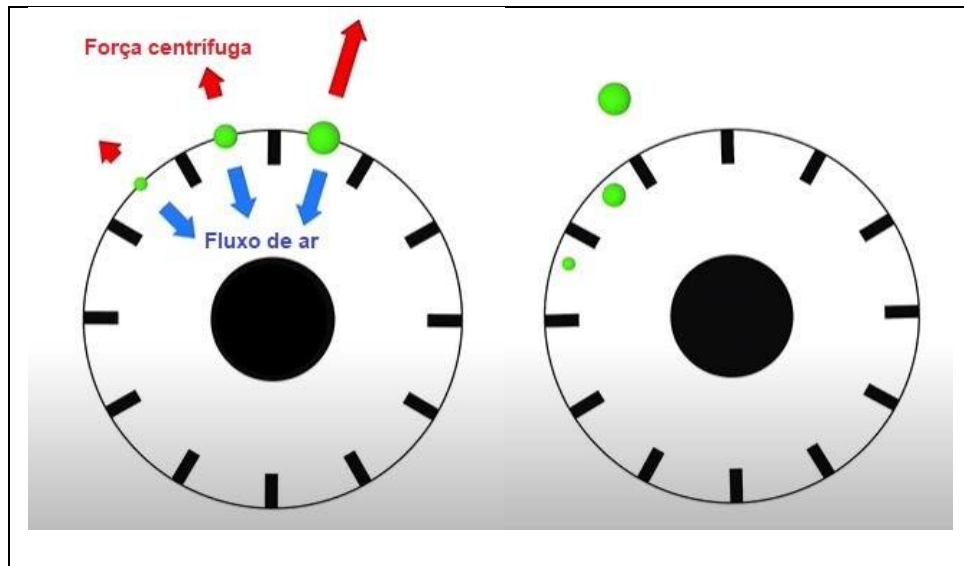


Fonte: adaptado de Voorhees (2013)

O material é alimentado no moinho de maneira pneumática juntamente com um fluidizante (sílica) e a micronização acontece pelo impacto das partículas de material nas superfícies rotativas de moagem e no revestimento fixo. O ar de resfriamento, transporte e classificação é aspirado através das ventoinhas na parte inferior do moinho e arrasta o material particulado até a zona de moagem onde irá colidir com os martelos e com o revestimento fixo (SPYROU, 2012).

A mistura de ar/produto é então distribuída uniformemente através das lâminas na zona de classificação rotativa. Duas forças estão presentes nesse processo: a força do ar empurrando as partículas para o centro do classificador e a força centrífuga lançando as partículas para fora dele como é demonstrado da figura 8 (SPYROU, 2012).

**Figura 8 - Classificação das partículas**



Fonte: adaptado de Hosokawa Alpine (2020)

Através das diferenças de massa, as partículas finas são empurradas para o centro e seguem o fluxo de ar para fora do equipamento. Já as partículas mais grossas são lançadas contra o revestimento fixo, passando mais vezes pelos martelos até apresentarem tamanho suficiente para vencer a força centrífuga da rotação e serem direcionadas para fora do moinho até o ciclone que irá fazer a seleção do produto final (SPYROU, 2012).

### 3.4 Métodos de experimentação

Quando se deseja melhorar um produto ou processo, é necessário que se realizem testes a fim de compreender todos os fatores que envolvem o objeto de pesquisa e como uma mudança neles influenciaria o resultado final. Para tanto, alguns métodos de experimentação podem ser utilizados a fim de planejar quais as mudanças e testes deverão ser realizados de modo que a resposta seja significativa ao todo.

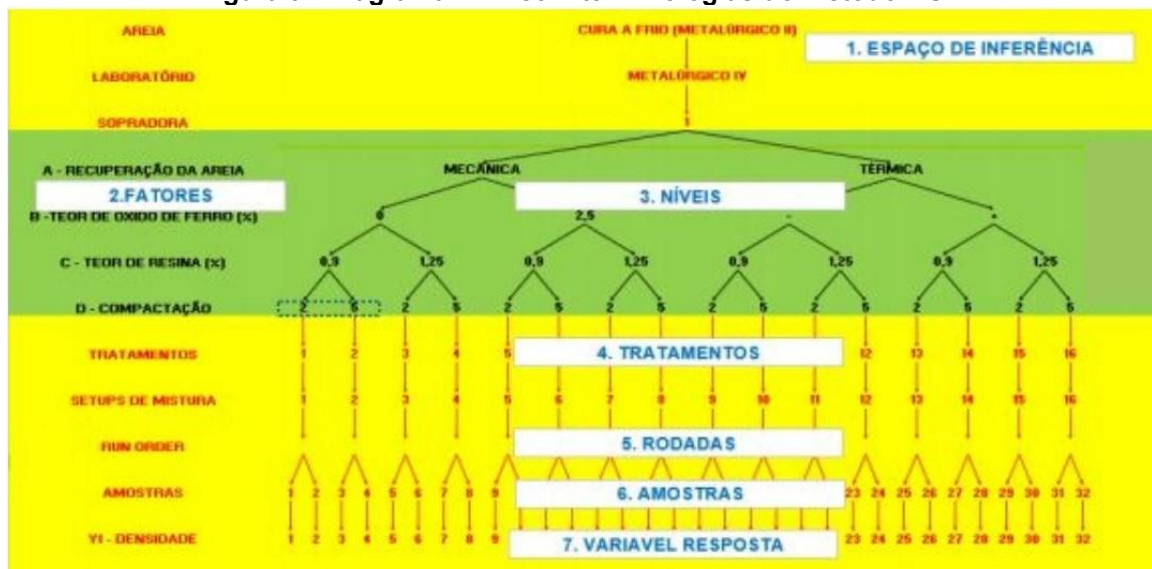
Um desses métodos é conhecido como *One-Factor-At-a-Time* (OFAT), Um Fator de Cada Vez, também citado como Abordagem Tradicional para Experimentação. Esse método consiste em variar um fator ou variável de cada vez, mantendo outros fatores ou variáveis em níveis fixos. Apesar de alguns autores tratarem esse método como uma abordagem ultrapassada, pois não avalia de forma dinâmica as mudanças projetadas, é ainda uma abordagem comum aplicada por

engenheiros industriais. O OFAT apresenta-se útil na fase inicial de investigação de um problema como, por exemplo, quando ainda se está definindo os níveis de um fator para depois aplicá-lo em um experimento mais complexo (UNTERLEIDER; CATEN, 2007; PIUCCO et. al, 2021).

Um segundo método de experimentação, este que recorre a análises de forma dinâmica, é o *Design of Experiments* (DOE), também citado como Planejamento de Experimentos ou Experimentação Planejada. Esse método consiste em determinar a relação entre fatores que influenciam em um processo, descobrindo as relações de causa e efeito entre uma variável dependente de interesse e as suas demais variáveis independentes (UNTERLEIDER; CATEN, 2007).

Por ser um método mais complexo, o DOE possui certas etapas e terminologias específicas na formação do processo experimental. A figura 9 esboça Diagrama de Relação dos Fatores (FRD, em inglês) de experimentos com alguns exemplos desses termos.

Figura 9 - Diagrama FRD com terminologias do método DOE



Fonte: Adaptado de Neto, 2020

Os tipos distintos de condições que são manipulados nas unidades experimentais são denominados fatores, ou seja, fatores são as variáveis cuja influência sobre a métrica está sendo estudada no experimento. Cada fator possui valores pré-estabelecidos chamados de níveis que serão os diferentes modos considerados no estudo. Em um processo DOE podem existir 2 ou 3 níveis por fator. Caso o fator apresente 2 níveis, os níveis serão divididos em (-1) e (+1) e caso haja 3 níveis, esses serão divididos em (-1), (0) e (+1) (NETO, 2020; PIUCCO et. al, 2021);



As combinações específicas dos níveis de diferentes fatores são denominadas tratamentos. Caso o experimento tenha 4 fatores de 2 níveis cada, ele terá 16 rodadas e 16 tratamentos. Cada um dos tratamentos representa uma combinação única entre os níveis e os fatores analisados no experimento e para cada uma dessas combinações realiza-se um ensaio ou rodada a fim de testá-lo. Cada ensaio gerará uma amostra, que é a unidade básica na qual será feita a medida da resposta, e esta resultará em uma variável resposta representando o resultado de interesse registrado (NETO, 2020; PIUCCO et. al, 2021).

O método de experimentação DOE pode ser executado de duas maneiras: o método de fatoriais completos ou o método fracionado. O experimento fatorial completo de 2 níveis ( $2^k$ , sendo k o número de fatores) testa todas as combinações possíveis de fatores, permitindo estimar os efeitos dos fatores e os efeitos das interações simultaneamente com igual precisão. No entanto, quando se deseja investigar 5 ou mais fatores, esse método começa a se tornar “caro” e “demorado” (PIUCCO et. al, 2021).

Além disso, sabe-se que poucos graus de liberdade de um experimento são estatisticamente significativos e, em geral, apenas os graus de liberdade de baixa ordem se mostram importantes. Dessa maneira, desenvolveu-se uma técnica de fracionamento do experimento que reduz a quantidade de rodadas e mantém a qualidade do modelo final. A técnica de fracionamento do experimento fatorial se resume a planejar uma estrutura experimental onde não será possível calcular os efeitos de todos os graus de liberdade, mas que force o confundimento do cálculo dos efeitos de menor ordem com os efeitos de ordem maiores (PIUCCO et. al, 2021).

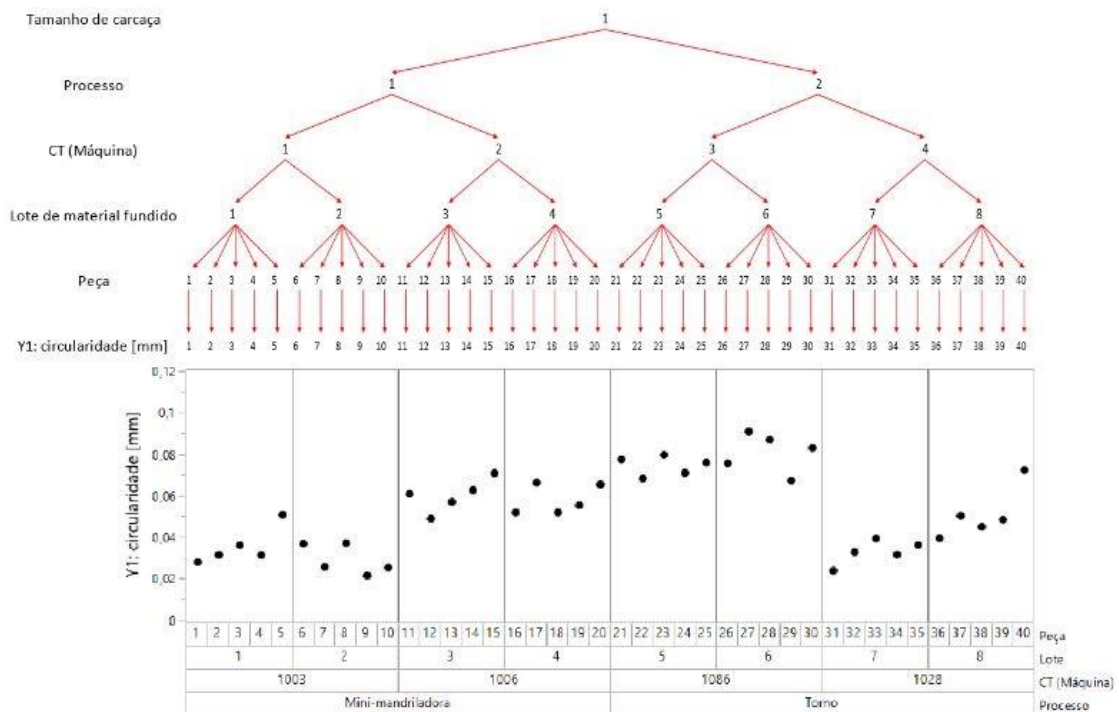
Um exemplo desse tipo de experimento seria uma análise com 4 fatores, em que a probabilidade de um grau de liberdade de primeira ordem ser estatisticamente significativo é muito maior que um grau de liberdade de terceira ordem. Dessa maneira, faz sentido forçar o confundimento de primeira ordem (A) com a terceira ordem (BCD) e assim resumir o experimento pela metade do seu tamanho inicial, mas em contrapartida não será possível separar o cálculo do efeito do grau de liberdade A e do grau de liberdade BCD. Realizando o experimento dessa forma, reduz-se um experimento de fatorial completo de 16 ensaios (2 níveis,  $2^4 = 16$  rodadas) para apenas 8 ensaios (2 níveis,  $2^{4-1} = 8$  rodadas) (PIUCCO et. al, 2021).

### 3.5 Métodos de análise de dados

#### 3.5.1 Variability Chart

O modo como os dados são analisados podem influenciar nas tomadas de decisão sobre onde concentrar esforços para os próximos passos. Uma ferramenta gráfica utilizada na indústria para a análise de dados é a *Variability Chart*, ou Diagrama de Frequência de Pontos. Essa ferramenta mostra todos os valores coletados de tal forma que os mesmos são dispostos de acordo com o plano de amostragem e os subgrupos utilizados para coletar os dados. Um exemplo dessa ferramenta é mostrado na figura 10.

**Figura 10 - Comparação entre dados no diagrama DOE e na *Variability Chart***

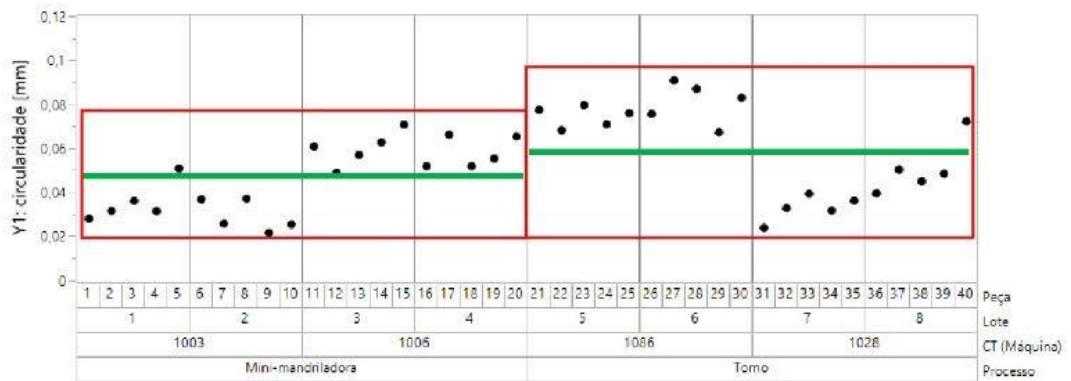


Fonte: Piucco e colaboradores (2021)

Na figura 10, todos os valores coletados estão dispostos de acordo com o plano de amostragem, do resultado da peça nº 1 até a peça nº 40. Abaixo encontram-se os diferentes lotes de material fundido, sendo que estão divididos a cada 5 peças. Em seguida, pode-se observar os centros de trabalho segregados a cada 10 peças e, por último, os processos de usinagem utilizados dispostos na base do gráfico (PIUCCO et. al, 2021).

Após a separação de cada uma das informações nesse tipo de gráfico, algumas análises podem ser realizadas. Por exemplo, se segregar a análise entre os dois processos de usinagem, já é possível observar que há uma diferença maior nos valores encontrados para o torno que para a mandriladora como é demonstrado na figura 11 (PIUCCO et. al, 2021).

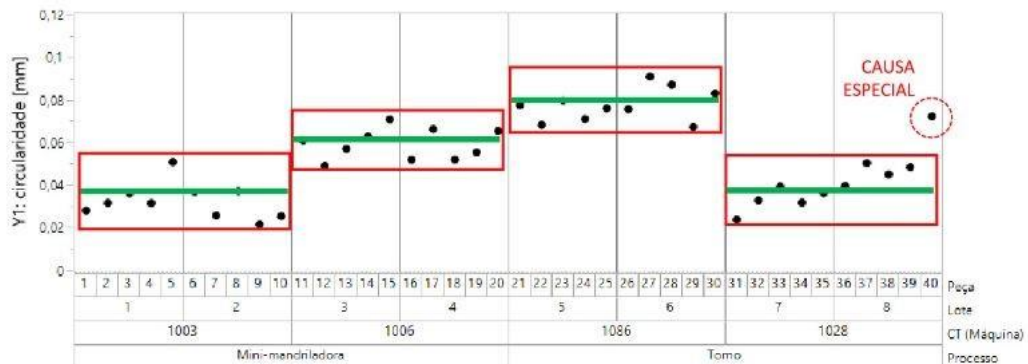
**Figura 11 – Análise por processos de usinagem**



Fonte: Piucco e colaboradores (2021)

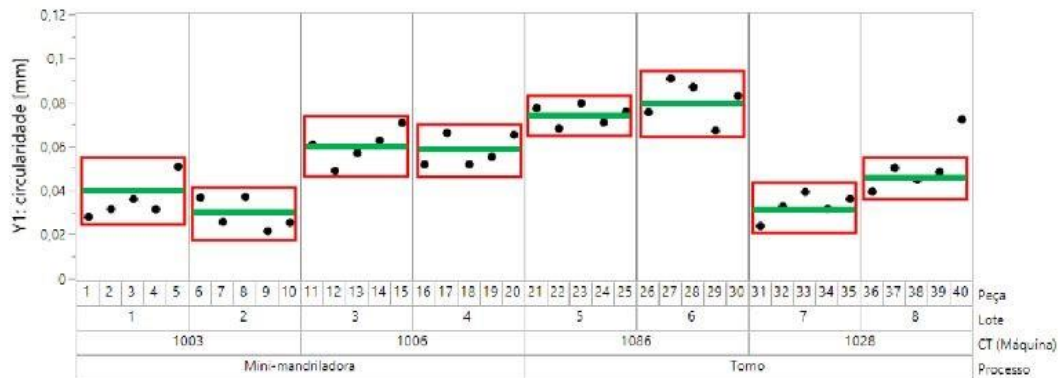
Agora, utilizando o mesmo diagrama, pode-se focar na diferenciação entre os centros de trabalho e entre os lotes de material, como é colocado nas figuras 12 e 13.

**Figura 12 - Análise por centros de trabalho**



Fonte: Piucco e colaboradores (2021)

**Figura 13 - Análise por lotes de material**



Fonte: Piucco e colaboradores (2021)

A primeira análise mostra a existência de grande variação entre os centros de trabalho, porém que dentro de cada um a variação é uniforme. Além disso, também aponta uma causa especial na peça 40 que deve ter o dado removido da análise. Já a segunda mostra que não há grandes variações entre os lotes, comparado com as demais fontes de variações. Dessa maneira, através da utilização de *Variability Charts* é possível realizar diversas análises gráficas de maneira dinâmica a fim de encontrar as principais causas dos problemas estudados (PIUCCO et. al, 2021).

### 3.5.2 Método de Análise de Variância (ANOVA) e teste F

Com a realização de diversos testes e consequentemente a obtenção de dados distintos, faz-se necessário a utilização de uma ferramenta que consiga segregar quais dados são significativamente diferentes entre si. Dessa forma, o Método de Análise de Variância (ANOVA) utiliza os valores quadrados dos desvios padrão entre as amostras a fim de decompor a variância total em partes atribuídas a causas conhecidas e independentes, e a uma porção residual de origem desconhecida e de natureza aleatória (PERTICARRARI, 2021).

A fim de comparar duas estimativas de variâncias independentes aplicam-se testes estatísticos nesses valores. O teste F compara os valores através da razão entre os quadrados médios com base em uma porcentagem de probabilidade. Ou seja,

$$F = \text{variação entre médias da amostra} / \text{variação dentro das amostras}$$

Escolhendo-se o nível de probabilidade/confiança a ser aplicado na análise, consultam-se os valores encontrados de F com aqueles tabelados para o dado nível de confiança. Caso F calculado seja maior ou igual ao F tabelado, o teste é significativo e os valores são diferentes entre si. Já se o F calculado for menor que o F tabelado, o teste não é significativo e as amostras não possuem diferenças estatísticas entre si. Atualmente, para esse tipo de análise estatística, utilizam-se *softwares* que fazem o cálculo e comparação entre as amostras já retornando quais valores são significativamente diferentes (PERTICARRARI, 2021).

#### 4 METODOLOGIA

A origem do trabalho se deu com uma necessidade da empresa WEG Tintas em reduzir o tempo de controle de processo na fase de moagem. Após o estabelecimento do problema, realizou-se uma análise crítica da operação em conjunto com membros da fábrica, laboratório e qualidade. O *brainstorm* contribuiu com a escolha dos experimentos que seriam efetuados ao fim de se estudar quais parâmetros de moagem eram relevantes na determinação do perfil granulométrico do pó, visto que essa era a etapa que mais impactava no tempo despendido pelos operadores, na forma de *setups* repetidos de máquina realizados até se alcançar um valor de  $d_{50}$  que estivesse compreendido no intervalo previsto na fórmula do produto.

Ressalta-se que antes da definição de quaisquer experimentos, fez-se necessário fixar um único produto e sistema de moagem para realização dos testes, visto que ambos seriam considerados ruídos nos experimentos. A escolha do sistema foi realizada primeiro, decidindo-se por estudar o sistema de moagem “MOI 12” da fábrica, pois era o que mais apresentava tempo de *setup* acumulado no período de um ano. A escolha do material/produto veio em decorrência do sistema de moagem – a tinta em pó com código interno 13506422 era a mais produzida no MOI 12 nesse mesmo período levantado. O produto tem como especificação  $d_{50}$  de 36 – 40  $\mu\text{m}$ , sendo o objetivo do trabalho garantir um valor enquadrado nessa especificação.

As aferições de granulometria do MOI 12 já eram feitas no equipamento de medição de partículas *Microtrac S-3000*, mantendo-se esse equipamento também para os experimentos realizados. O *software* do equipamento gera para cada aferição

um relatório com a curva de distribuição granulométrica e os diferentes percentis  $d_x$ . Um exemplar pode ser encontrado no anexo 1.

Utilizou-se o *software* estatístico JMP Pro 13 para a realização dos cálculos e geração dos gráficos.

O primeiro experimento proposto tinha como objetivo determinar se a quantidade micronizada de tinta antes da coleta de uma amostra tinha influência no resultado de granulometria, ou seja, se nas mesmas configurações de máquina e material somente alterando-se o tempo de espera para coleta de uma amostra resultaria em algum resultado divergente. A origem desse questionamento se deu pela dúvida de se haver necessidade em aguardar que a operação alcance estado estacionário. Para tanto, decidiu-se realizar um OFAT (ver anexo 2 para formulário do experimento).

O segundo experimento proposto tinha como objetivo avaliar o impacto da mudança de diferentes variáveis controláveis no resultado de granulometria. As variáveis têm relação com os parâmetros configuráveis de máquina e a tela de peneiramento. O experimento, conduzido aos moldes de um DOE (ver anexo 3 para formulário), foi feito no formato fatorial fracionado, com 6 fatores de nível 2 e 2 fracionamentos, apresentando resolução IV (fatores principais são confundidos com interações de terceira ordem, interações de segunda ordem confundem-se entre si). A tabela 1 mostra com detalhe os fatores e níveis analisados no experimento, estes determinados em nível de acordo com os limites do próprio maquinário (e na questão da tela a disponibilidade em fábrica):

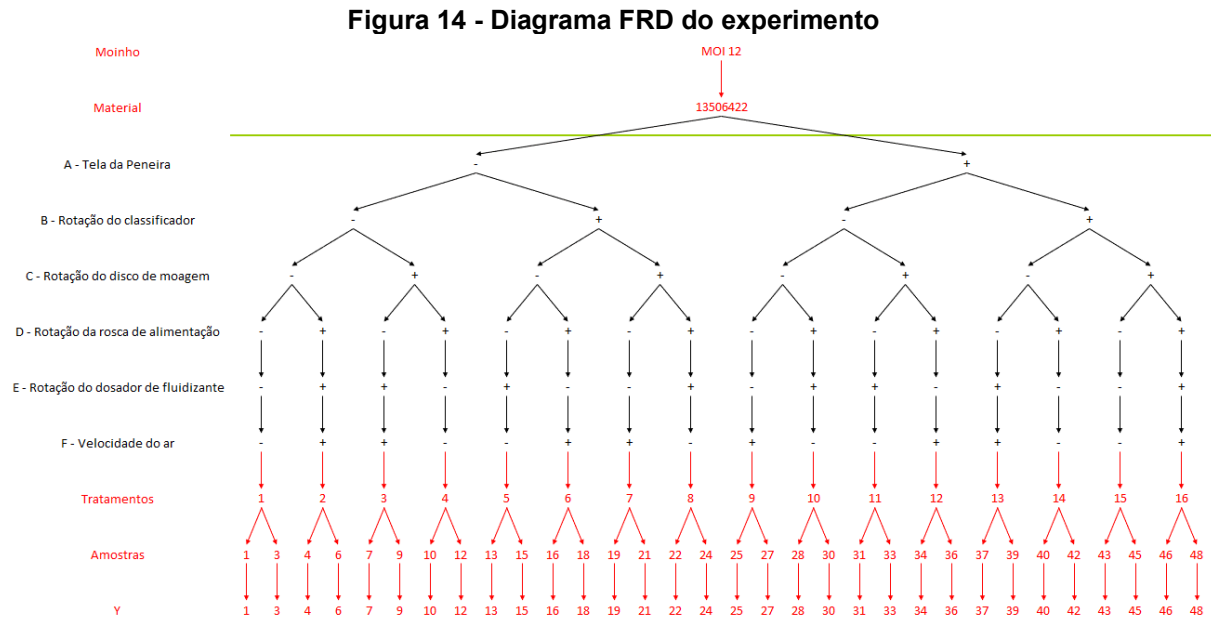
**Tabela 1 - Fatores e níveis utilizados no experimento**

<b>Fator</b>	<b>Nível (-)</b>	<b>Nível (+)</b>	<b>Unidade de medida</b>
A – Abertura da tela da peneira	74	125	$\mu\text{m}$
B – Rotação do classificador	15	28	m/s
C – Rotação do disco de moagem	85	119	m/s
D – Rotação da rosca de alimentação	7	30	RPM
E – Rotação do dosador de fluidizante	0,55	1,5	RPM
F – Vazão do ar	60	75	$\text{m}^3/\text{min}$

Fonte: o autor (2022)

Ainda no segundo experimento, para avaliação e redução da influência de ruídos na análise, como mudanças de temperatura, pressão e umidade relativa do sistema, optou-se por utilizar a ferramenta ANOVA baseada na amostragem de triplicata para cada tratamento do experimento fatorial. A figura 14 traz o Diagrama de

Relação dos Fatores (FRD, em inglês) do experimento completo conforme DOE e ANOVA:



A condução tanto do experimento 1 quanto do experimento 2 se deu pela seguinte sequência de passos: *Setup* do sistema de moagem nos parâmetros pré-estabelecidos, partida do sistema, coleta da amostra, parada do sistema e então análise do d50 da amostra no equipamento de medição de granulometria.

**5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

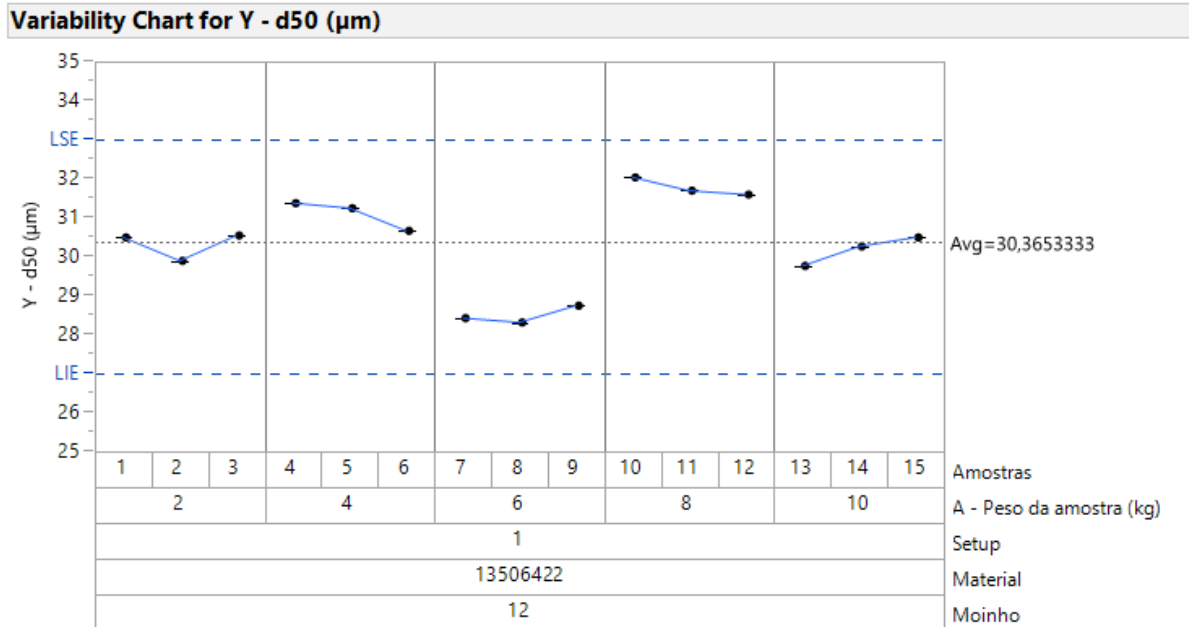
Nas seguintes seções serão apresentados os resultados dos experimentos de OFAT e ANOVA/DOE supracitados.

**5.1 OFAT do tempo de coleta da amostra**

O anexo 4 contém os valores coletados para cada amostra do experimento OFAT em formato de quadro.

A figura 15 contém os resultados em forma gráfica. A linha pontilhada cinza representa a média global, enquanto as linhas pontilhadas azuis abaixo e acima compreendem o LIE (Limite Inferior de Especificação) e o LSE (Limite Superior de Especificação) do produto estudado, respectivamente, partindo do d50 médio.

Figura 15 - Variability chart do experimento



Fonte: o autor (2022)

Analisando o gráfico pode-se afirmar que nenhuma causa especial foi detectada, seja na forma de *outliers* ou formação de tendência global, caracterizando que os valores em suma são exclusivamente oriundos da variação gerada nas diferentes amostragens, não de um descuido com o experimento ou influência externa. Todos os dados se encontram dentro dos limites do produto (3 µm), porém não apresentam uma evolução que possa ser correlacionada ao peso da amostra, demonstrando que esse não é um fator de interesse para o controle da granulometria.

A disparidade dentre os valores é provavelmente originária de algum ruído inerente à operação, não de controle direto por meio do peso da amostra micronizada para aferição. Por conta disso, não houve a distinção de um valor “ótimo” para o prosseguimento com o experimento de DOE, optando-se por fixar o peso micronizado em 5 kg por padronização.

**5.2 ANOVA**

Os resultados do experimento em forma de quadro encontram-se no anexo 5. A ferramenta ANOVA foi aplicada sobre esses valores, gerando um resultado de estatística F. Considerando confiança de 95% para os graus de liberdade envolvidos (numerador 15 e denominador 32) o valor F mínimo necessário para rejeição da hipótese nula é de 1,99. A razão F entre os fatores e o erro apresentou resultado de



541,01, o valor-p sendo menor que 0,0001. A figura 16 demonstra esses resultados conforme apresentados no *software* JMP.

**Figura 16 - Análise de variância do experimento**

<b>Analysis of Variance</b>				
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	15	4944,4730	329,632	541,0133
Error	32	19,4971	0,609	<b>Prob &gt; F</b>
C. Total	47	4963,9701		<,0001*

Fonte: o autor (2022)

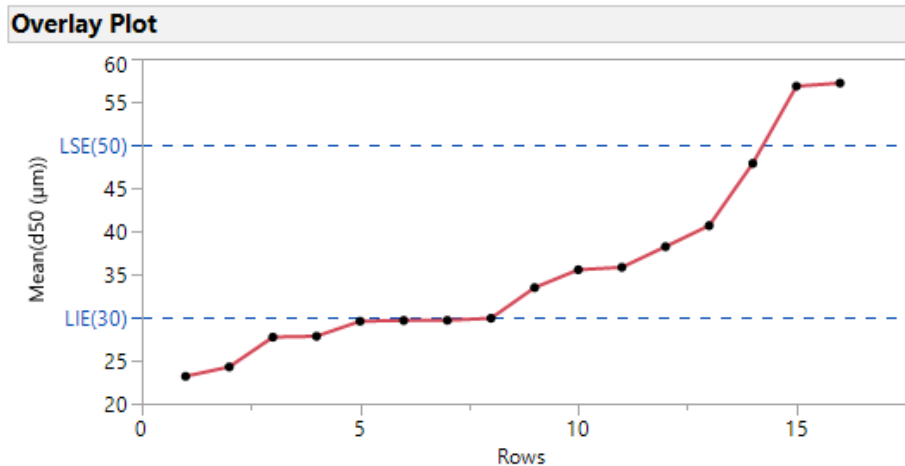
Em síntese, por meio do valor-p e comparação do F obtido ao tabelado é possível destacar a importância estatística significativa da influência dos fatores se comparado aos ruídos do experimento. Com isso a hipótese nula é rejeitada, prosseguindo-se com a análise da influência dos fatores por meio da ferramenta DOE.

### 5.3 DOE

Os resultados do experimento em formato de quadro, tomados em relação aos tratamentos via cálculo da média das amostras para a análise via DOE, estão expostos no anexo 5.

As médias de cada tratamento foram primeiramente elencadas em ordem crescente e dispostas como apresentadas na figura 17. Nessa figura o LIE e o LSE, em linha pontilhada azul, representam o *range* da granulometria estipulada para uma gama de produtos que são micronizados no moinho.

**Figura 17 - Médias dos valores de granulometria dos experimentos**

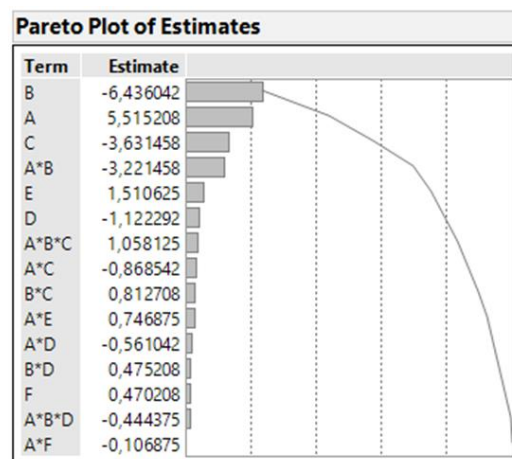


Fonte: o autor (2022)

Por meio da análise gráfica é visto que as configurações tomadas enquadram um intervalo considerável de granulometrias possíveis, sendo que o  $d_{50}$  objetivo de média 38  $\mu\text{m}$  está compreendido, assegurando a importância do experimento.

A próxima análise se limita em delimitar quais fatores e interações foram os mais críticos na variação da granulometria. Para tal, organizou-se os coeficientes (*Estimate*) de cada fator em ordem decrescente de peso absoluto em relação ao  $d_{50}$ , apresentado na figura 18.

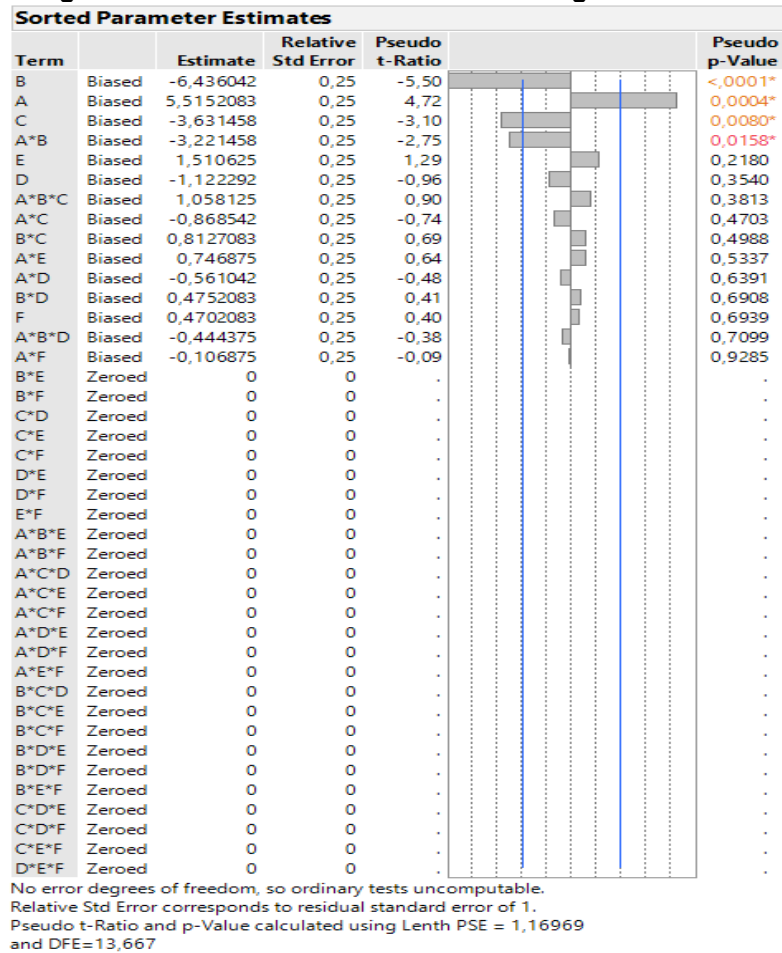
**Figura 18 - Pareto dos fatores e interações**



Fonte: o autor (2022)

Como medida de corte, optou-se em utilizar valores que apresentaram valor- $p$  abaixo de 0,250, ou 75% de confiança. A figura 19 é um recorte dos resultados conforme apresentados no *software* JMP.

**Figura 19 - Análise dos fatores críticos na granulometria**



Fonte: o autor (2022)

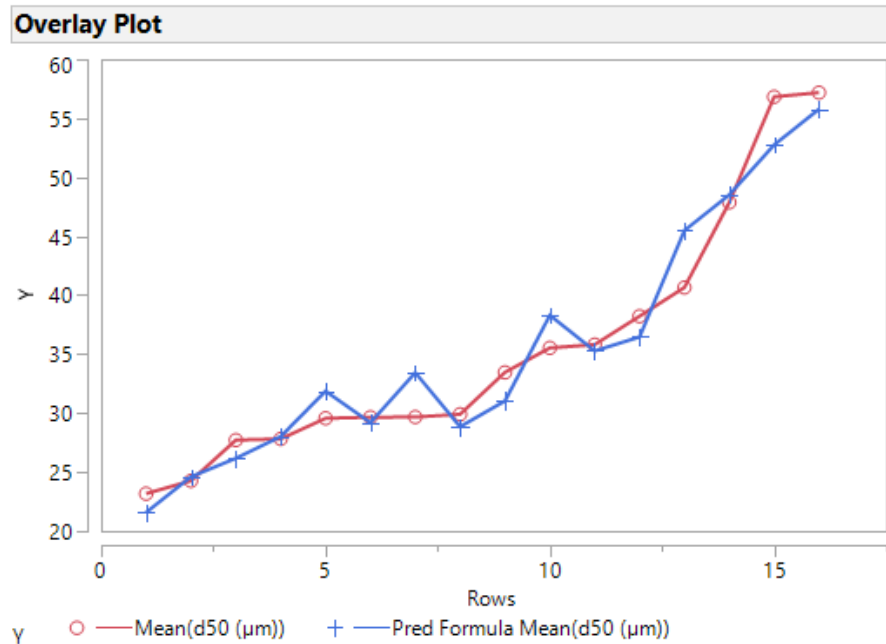
Foram críticos os fatores com valor-p abaixo de 0,250, ou seja, B (rotação do classificador), A (abertura de tela da peneira), C (rotação do disco de moagem), A\*B e E (rotação do dosador de fluidizante). Delimitando uma regressão com esses fatores críticos, obteve-se uma expressão matemática.

$$d_{50} = 35,47 + 5,51 \cdot A - 6,44 \cdot B - 3,63 \cdot C - 3,33 \cdot A * B + 1,51 \cdot E \quad (1)$$

Essa equação serve como forma de se prever o comportamento do  $d_{50}$  dados os parâmetros a ser utilizados ou, como finalidade do presente trabalho, dado um  $d_{50}$  objetivo estimar quais os parâmetros ideais para a micronização.

A figura 20 mostra um gráfico com os valores obtidos no experimento, linha vermelha, em comparação aos valores obtidos calculando-se com a equação acima, apresentados em linha azul.

**Figura 20 - Comparação entre os valores experimentais e os valores calculados matematicamente**

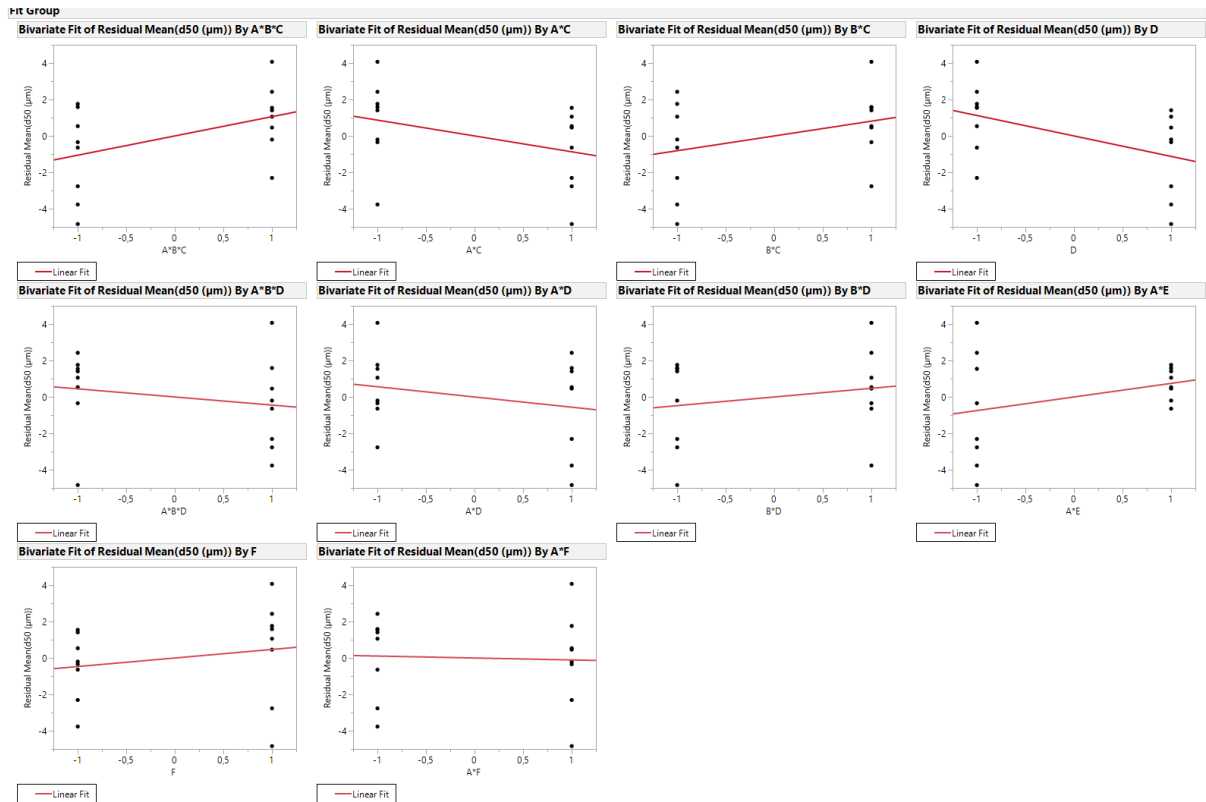


Fonte: o autor (2022)

Pela figura é possível visualizar que as duas curvas se aproximam. Essa hipótese é reforçada por meio do cálculo de  $R^2$ , este apresentando valor aproximado de 0,948. O  $R^2$  ajustado, para análise dos termos da equação, apresenta valor aproximado de 0,922.

Uma análise residual foi realizada na sequência para verificar se a inclusão de mais um parâmetro na equação seria benéfica, aumentando o valor de  $R^2$ . O método de regressão bivariada foi utilizado, dispondo os parâmetros não considerados na abscissa e os resíduos da regressão original nas ordenadas. A regressão pode ser visualizada na figura 21.

Figura 21 - Análise de regressão bivariada



Fonte: o autor (2022)

Dos gráficos, aquele que apresenta a relação entre A\*E e os resíduos foi o que mais se destacou, apresentando alta aproximação no nível “1”. Decidiu-se montar uma nova expressão considerando o A\*E como coeficiente. Calculou-se os novos  $R^2$ 's, resultando em  $R^2$  de 0,954 e  $R^2$  ajustado de 0,923. Por apresentar pequena contribuição ao  $R^2$ , descartou-se essa segunda equação e adotou-se a anterior como resultado oficial do experimento.

#### 5.4 Validação posterior

Para validar a expressão obtida com o DOE, conduziu-se mais um experimento em data posterior, mantendo-se o mesmo produto e moinho estudados, porém com parâmetros de máquina calculados com base na equação obtida visando o 38 µm médio especificado. A tabela 2 expressa seis situações estudadas.

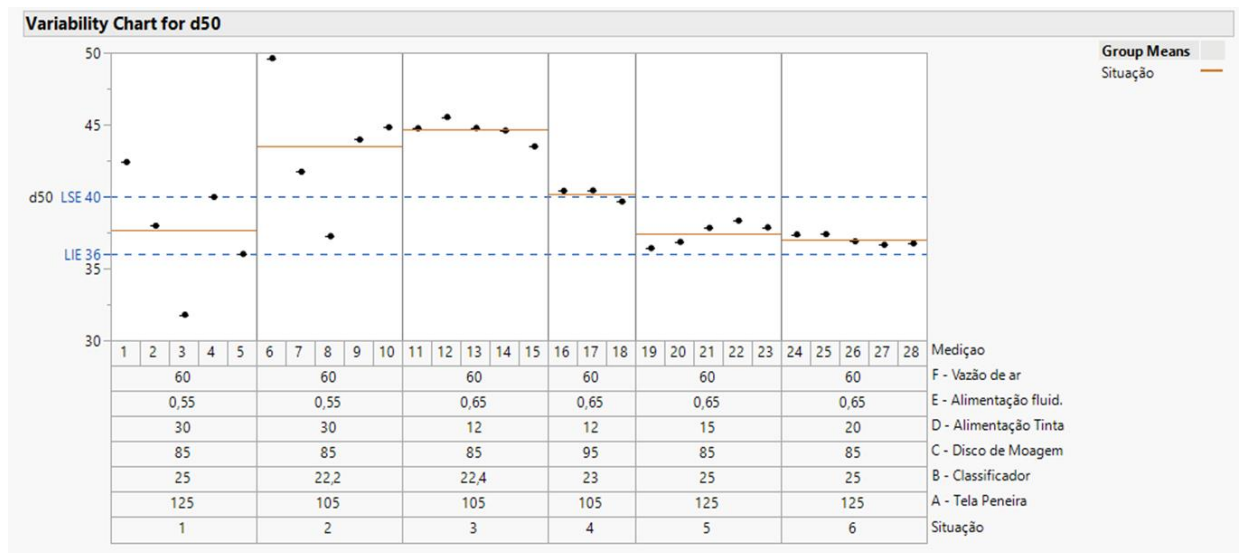
Tabela 2 - Configurações avaliadas nos testes

Situação	A – Abert. tela da peneira	B – Rot. do classificador	C – Rot. do disco de moagem	D – Rot. da rosca de alimentação	E – Rot. do dosador de fluidizante	F – Vazão de ar
1	125 $\mu\text{m}$	25 m/s	85 m/s	30 RPM	0,55 $\text{s}^{-1}$	60 $\text{m}^3/\text{s}$
2	105 $\mu\text{m}$	22,2 m/s	85 m/s	30 RPM	0,55 $\text{s}^{-1}$	60 $\text{m}^3/\text{s}$
3	105 $\mu\text{m}$	22,4 m/s	85 m/s	12 RPM	0,65 $\text{s}^{-1}$	60 $\text{m}^3/\text{s}$
4	105 $\mu\text{m}$	23 m/s	95 m/s	12 RPM	0,65 $\text{s}^{-1}$	60 $\text{m}^3/\text{s}$
5	125 $\mu\text{m}$	25 m/s	85 m/s	15 RPM	0,65 $\text{s}^{-1}$	60 $\text{m}^3/\text{s}$
6	125 $\mu\text{m}$	25 m/s	85 m/s	20 RPM	0,65 $\text{s}^{-1}$	60 $\text{m}^3/\text{s}$

Fonte: o autor (2022)

A configuração 1 é a mais idealizada conforme a equação de granulometria, visto a alta produtividade (kg/h) devido à maior rotação da rosca de alimentação e menor perda por rejeito e geração de finos devido a utilização do nível mínimo de rotação do disco de moagem. As demais configurações são variações conforme diferentes condições já utilizadas no chão de fábrica em relação a alimentação, abertura de tela e dosagem de fluidizante, recalculando os demais valores (rotação do disco de moagem e classificador) com a equação de granulometria. A figura 22 apresenta a visão gráfica dos resultados acompanhados, LIE e LSE representando os limites de tolerância de  $d_{50}$  do produto com linha azul pontilhada, as linhas laranjas representando a média de cada configuração.

Figura 22 - Variability chart da validação

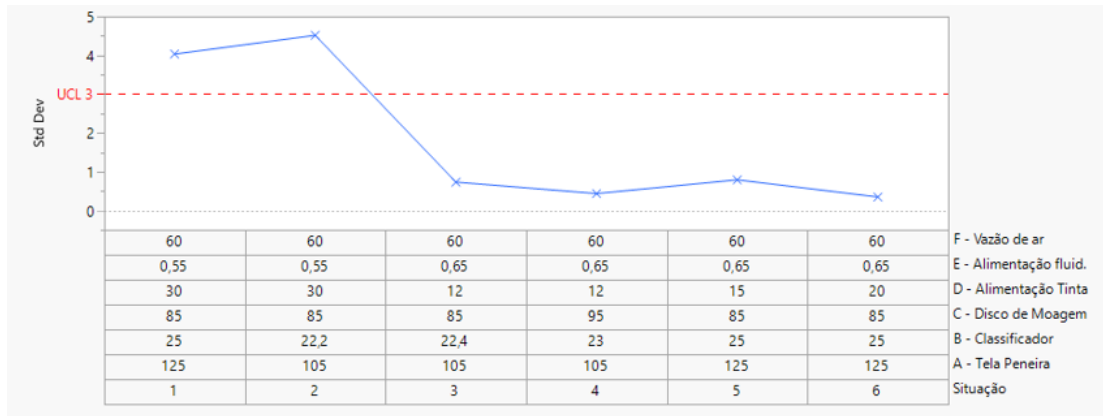


Fonte: o autor (2022)

A validação foi essencial em destacar que mesmo a situação 1 sendo a ideal, o valor médio estando dentro do esperado, há variação considerável dentre os pontos. As situações 2, 3 e 4 demonstram *shift* considerável do intervalo objetivo, sendo que o motivo deste deslocamento provavelmente se dá pelo fato de que a abertura de tela

de 105  $\mu\text{m}$  não foi testada efetivamente, somente outros extremos, esclarecendo que a influência dessa variável não é linear. As situações 5 e 6 são variações semelhantes da situação 1, entretanto com alimentação de tinta menores e rotação do dosador de fluidizante conforme padronização do chão de fábrica. A figura 23 apresenta o desvio padrão de cada configuração.

**Figura 23 - Desvio padrão médio das configurações**



Fonte: o autor (2022)

O gráfico de desvio padrão realça que as situações 5 e 6 são variações mais controladas da situação 1, e que uma taxa de alimentação de tinta alta degrada a repetibilidade da granulometria das amostras coletadas. A linha pontilhada vermelha representa o UCL (*Upper Control Level*, Limite Superior de Controle) fixada em 3  $\mu\text{m}$  por conta das especificações do produto, sendo que a baixa alimentação garante um desvio padrão sob controle abaixo do UCL.

## 6 CONCLUSÃO

Os experimentos conduzidos no chão de fábrica partiram de uma necessidade de redução do tempo de *setup* da operação de moagem, incentivados pela necessidade de se aprofundar o conhecimento em relação ao impacto das diferentes configurações de máquinas de forma exploratória. A equação obtida ao final do DOE, limitada numericamente ao sistema de moagem e ao produto estudados, é também um aprendizado geral da criticidade dos diferentes parâmetros na formação da granulometria final de qualquer produto, em qualquer sistema ICM.

Esse conhecimento será empregado para esta e outras configurações de moagem de tinta em pó da empresa, auxiliando na agilidade da padronização das

operações, garantindo melhor qualidade no produto entregue e diminuição do tempo gasto em atividades sem valor agregado. Como sugestão para próximos trabalhos, vale um estudo mais aprofundado nas demais variáveis do sistema que não se tem controle direto, os ruídos.

## 7 REFERÊNCIAS

DIAMOND VOGEL INDUSTRIAL COATINGS. **Particle size distribution**, 2021. Disponível em: <<https://www.diamondvogel.com/documents/diamond-vogel-particle-size-distribution-tech-bulletin>> Acesso em: 27 mai. 2022.

EPRISTINA. **Manual Técnico de Pintura Pó**, 2016. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/3884704-Apresentacao-tintas-em-po.html>>. Acesso em: 24 jun. 2022.

GUTOWSKI. W. V. S. From Nature's Designs to Advanced Sustainable Coatings. In: EUROPEAN COATINGS CONFERENCE, 2013, Düsseldorf. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/280125916\\_From\\_Nature's\\_Designs\\_to\\_Advanced\\_Sustainable\\_Coatings](https://www.researchgate.net/publication/280125916_From_Nature's_Designs_to_Advanced_Sustainable_Coatings)> Acesso em: 15 mai. 2022

HOSOWAKA ALPINE. **Hosokawa Alpine Classifier Mill ACM - Principle of Operation**. 2020. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=-fLGtONpcQA>> Acesso em: 27 mai. 2022.

IGTEC BRASIL. **Defeitos na pintura eletroestática - “Casca de laranja”**, 2019. Disponível em: <<https://igtecbrasil.com.br/index.php/pt/2019/11/04/defeitos-na-pintura-eletrorstatica-casca-de-laranja/>> Acesso em: 27 mai. 2022.

MARK, Hermann. **Encyclopedia of polymer science and technology**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.

MIRANDA, Sandra Cristina Fraga. **Desenvolvimento e caracterização de tintas em pó com resistência à água**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Química, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2010. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/71304/1/000145843.pdf>> Acesso em: 15 mai. 2022.

MORDOR INTELLIGENCE. **Powder coatings market - growth, trends, covid-19 impact, and forecasts (2022 - 2027)**. Fev. 2022. Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/powder-coatings-market#:~:text=Market%20Overview,for%20the%20powder%20coatings%20market.gs>> Acesso em: 4 mai. 2022.

NETO, Fernando Teles de Farias. **A utilização do método doe no estudo do volume ativo de um motor de indução trifásico**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2020. Disponível em: <



<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/204012/TCC.pdf?sequence=1&isAllowed=y> > Acesso em: 27 mai. 2022.

PERTICARRARI, Amanda Liz Pacifico Manfrim. **Aula 4 – Testes de Significância**. Jaboticabal: UNESP, 2021. Disponível em: <<https://www.fcav.unesp.br/Home/departamentos/cienciasexatas/AMANDALIZPACIFI/COMANFRIM/aula-4.pdf>> Acesso em: 27 mai. 2022

PIUCCO, Olimpio Robson; SGUISSARDI, Luchese Matheus; SCHURT, Cesar Leonardo; SILVA, Tiago Ghiggi Caetano da. **Six Sigma Green Belt**. Jaraguá do Sul: WEG, 2021.

POLIFORMA. **Rotomoldagem e Extrusão: dois processos de transformação do plástico**, 2018. Disponível em: <<https://poliforma.ind.br/artigos-blog/rotomoldagem-e-extrusao>> Acesso em: 27 abr. 2022.

RELOSI, Natanael. **Obtenção e caracterização de tintas em pó base epóxi/poliéster com incorporação de argilominerais: montmorilonita (MMT) e mica muscovita**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ucs.br/xmlui/handle/11338/1176>> Acesso em: 27 mai. 2022.

SANCHES. Isabel Maria Ramos Bordalo. **Esbranquiçamento de revestimentos de tinta em pó: compreensão e reformulação**. 2011. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Química, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2011. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/64672/1/000146477.pdf>> Acesso em: 15 mai. 2022.

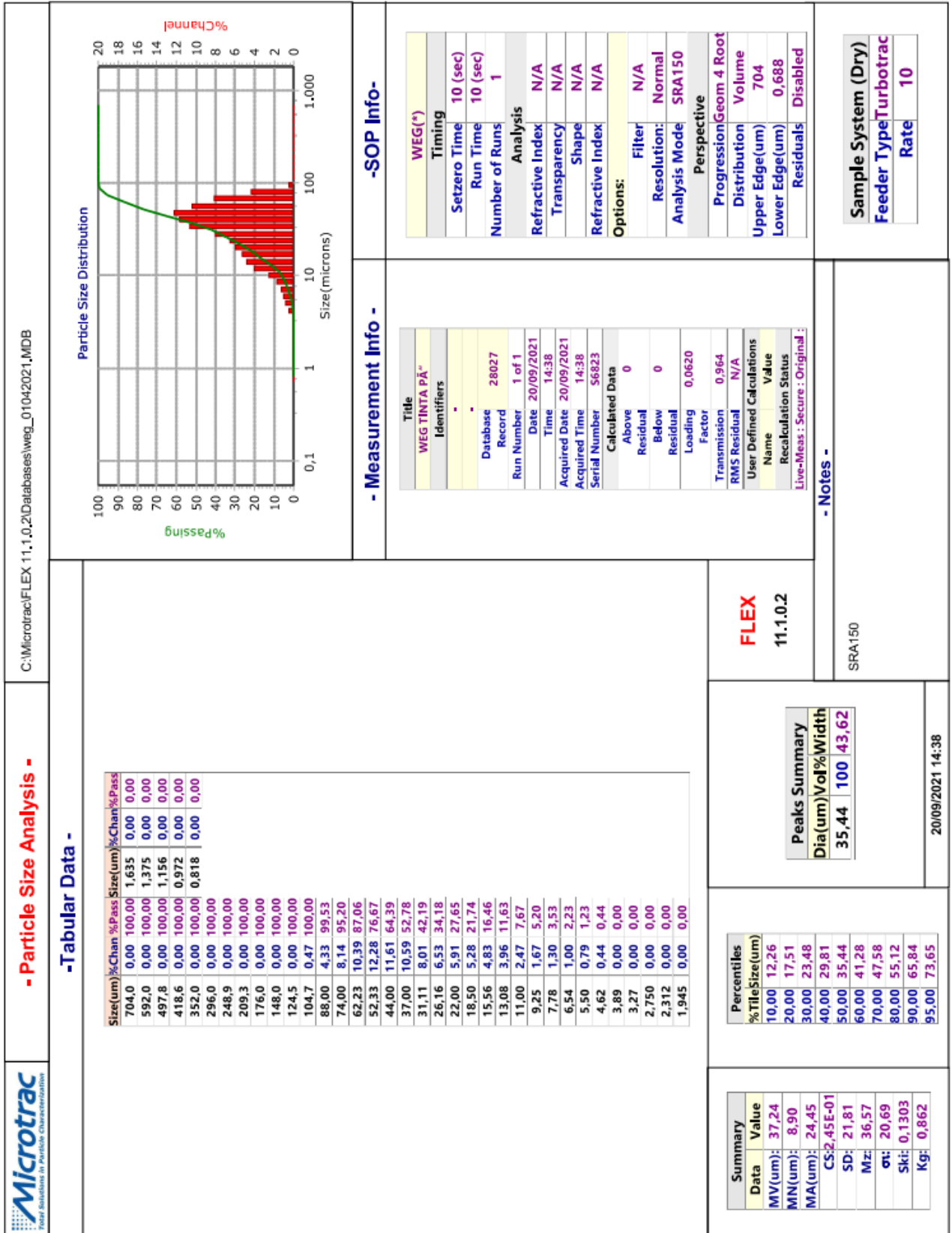
SPYROU, Emmanouil. **Powder Coatings: Chemistry and Technology**. 3. ed. Hanover: Vincentz Network, 2012.

UNTERLEIDER, Carlos Eduardo Appollo; CATEN, Carla Schwengber ten. Aplicação de um método de otimização multivariada para seleção entre duas matérias-primas de uma reação química. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 4, 2007, Águas de São Pedro. Disponível em: <<https://www.abcm.org.br/anais/cobef/2007/files/163005287.pdf>> Acesso em: Acesso em: 27 mai. 2022.


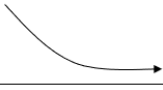
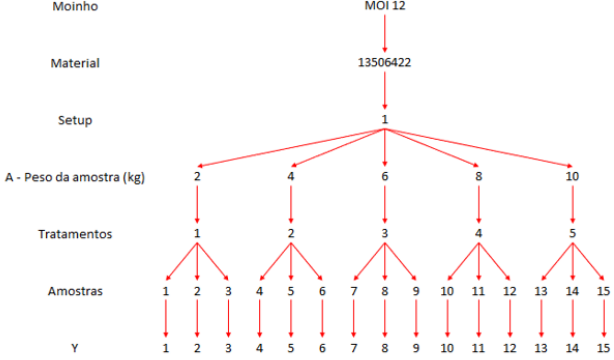
VOORHESS, Rob. **How to operate na air classifier mill to meet your fine grindings goals**. CSC Publishing, 2013.

8 ANEXOS




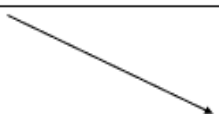
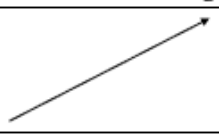

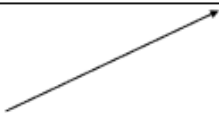
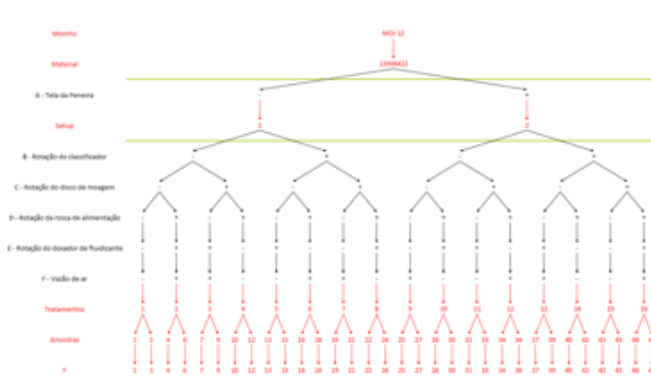
ANEXO 1 – Relatório de granulometria Microtrac S-3000



## ANEXO 2 – Formulário do experimento OFAT

	<b>FORMULÁRIO PADRÃO - OFAT</b>				
<b>Objetivo</b>					
Observar a variação do d50 da amostra de tinta micronizada alterando o peso processado (2 a 2 kg).					
<b>Informações prévias</b>					
O d50 será obtido por análise no Microtrac da fábrica. Os demais parâmetros de máquina serão mantidos constantes. Só serão considerados os valores após retomada da moagem (vindo de máquina parada). Os experimentos serão conduzidos em um mesmo lote de material, em sequência, com o intuito de diminuir ao máximo quaisquer ruídos adversos.					
<b>Variáveis de resposta</b>					
Y1 = d50 da amostra (µm)					
Fator	Nível (-)	Nível (+)	Teoria	Previsão	Observações
A - Peso micronizado	2 kg	10 kg	O peso micronizado tem relação direta com o tempo de micronização	Quanto maior o peso, mais tempo o sistema tem para se estabilizar, reduzindo a variação da amostra e também o valor médio do d50 (até alcançar a estabilidade).	
<b>Variáveis - Ruído</b>			<b>Estratégia de tratamento</b>		
Parâmetros de moagem			Fixar		
Características de material			Fixar		
<b>FRD</b>			<b>Matriz de confundimento</b>		
<div style="text-align: center;">  </div>			N/C		

### ANEXO 3 – Formulário do experimento ANOVA / DOE

 <h2 style="text-align: center;">FORMULÁRIO PADRÃO - DOE</h2>																																					
<b>Objetivo</b>																																					
Observar a variação do d50 da amostra de tinta micronizada alterando os parâmetros de moagem e peneira.																																					
<b>Informações prévias</b>																																					
O d50 será obtido por análise no Microtrac da fábrica.																																					
<b>Variáveis de resposta</b>																																					
Y1 = d50 da amostra (µm)																																					
Fator	Nível (-)	Nível (+)	Teoria	Previsão	Gráfico																																
A - Tela da Peneira	74 µm	125 µm	A abertura da tela da peneira dita qual vai ser o diâmetro de corte de topo do produto final.	Quanto maior a abertura da tela, mais partículas grossas estarão presentes no produto final.																																	
B - Rotação do classificador	15 m/s	28 m/s	A rotação do classificador está ligada à velocidade periférica das aletas. A velocidade periférica tem efeito na força de arraste das partículas na direção tangencial à coroa aletada.	Um aumento na velocidade tangencial gera maior força de arraste, esta impactando partículas mais grossas (maior área de contato com os vetores de arraste), jogando-as contra as paredes ao invés de classificá-las ao centro.																																	
C - Rotação do disco de moagem	85 m/s	119 m/s	A velocidade radial do disco de moagem está diretamente ligada à energia cinética que é convertida em deformação (e consequente quebra) das partículas.	Aumentando a rotação do disco há a tendência de diminuição do tamanho das partículas.																																	
D - Rotação da rosca de alimentação	7 RPM	30 RPM	A rotação da rosca de alimentação está relacionada à vazão mássica de tinta e consequentemente ao preenchimento do volume do moinho.	Aumentando o preenchimento de tinta, diminui-se a probabilidade de impacto direto entre pino/parede e partícula, resultando em colisões menos eficazes e maior acúmulo de partículas grossas.																																	
E - Rotação do dosador de fluidizante	0,55	1,5	A rotação da rosca de dosagem de fluidizante está relacionada à vazão mássica de fluidizante e consequentemente à proporção desse componente no produto final.	O fluidizante possui granulometria menor que 1 µm - uma maior quantidade de componente no material resultará em mais finos.																																	
F - Vazão do ar	60 m³/min	75 m³/min	A velocidade do ar está diretamente relacionada à velocidade da partícula pela força de arraste.	Um aumento na velocidade de ar gera maior arraste nas partículas e consequentemente mais partículas grossas são classificadas pelo separador.																																	
<b>Variáveis - Ruído</b>			<b>Estratégia de tratamento</b>																																		
Temperatura do ar antes da moagem			Monitorar																																		
Temperatura do ar após moagem			Monitorar																																		
Largura do chips			Monitorar																																		
Espessura do chips			Monitorar																																		
Temperatura do chips			Monitorar																																		
Material			Fixar																																		
Desgaste do moinho			Monitorar																																		
Estanqueidade do sistema			Monitorar																																		
ddp do filtro manga			Monitorar																																		
<b>FRD</b>			<b>Matriz de confundimento</b>																																		
			$2_{IV}^{6-2} = 16$ tratamentos (Rounds) <table border="1" data-bbox="1069 1702 1260 2016"> <thead> <tr> <th>Term</th> <th>Details</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>A*F</td><td>=B*E=C*D</td></tr> <tr><td>A*E</td><td>=B*F</td></tr> <tr><td>B*D</td><td>=C*E</td></tr> <tr><td>A*D</td><td>=C*F</td></tr> <tr><td>B*C</td><td>=D*E</td></tr> <tr><td>A*C</td><td>=D*F</td></tr> <tr><td>A*B</td><td>=E*F</td></tr> <tr><td>F</td><td>=A*B*E=A*C*D</td></tr> <tr><td>E</td><td>=A*B*F=B*C*D</td></tr> <tr><td>A*B*D</td><td>=A*C*E=B*C*F=D*E*F</td></tr> <tr><td>D</td><td>=A*C*F=B*C*E</td></tr> <tr><td>A*B*C</td><td>=A*D*E=B*D*F=C*E*F</td></tr> <tr><td>C</td><td>=A*D*F=B*D*E</td></tr> <tr><td>B</td><td>=A*E*F=C*D*E</td></tr> <tr><td>A</td><td>=B*E*F=C*D*F</td></tr> </tbody> </table>			Term	Details	A*F	=B*E=C*D	A*E	=B*F	B*D	=C*E	A*D	=C*F	B*C	=D*E	A*C	=D*F	A*B	=E*F	F	=A*B*E=A*C*D	E	=A*B*F=B*C*D	A*B*D	=A*C*E=B*C*F=D*E*F	D	=A*C*F=B*C*E	A*B*C	=A*D*E=B*D*F=C*E*F	C	=A*D*F=B*D*E	B	=A*E*F=C*D*E	A	=B*E*F=C*D*F
Term	Details																																				
A*F	=B*E=C*D																																				
A*E	=B*F																																				
B*D	=C*E																																				
A*D	=C*F																																				
B*C	=D*E																																				
A*C	=D*F																																				
A*B	=E*F																																				
F	=A*B*E=A*C*D																																				
E	=A*B*F=B*C*D																																				
A*B*D	=A*C*E=B*C*F=D*E*F																																				
D	=A*C*F=B*C*E																																				
A*B*C	=A*D*E=B*D*F=C*E*F																																				
C	=A*D*F=B*D*E																																				
B	=A*E*F=C*D*E																																				
A	=B*E*F=C*D*F																																				

### ANEXO 4 – Resultados tabelados OFAT

<b>Dados OFAT</b>					
<b>Moinho</b>	<b>Material</b>	<b>A- Peso micronizado [kg]</b>	<b>Tratamento</b>	<b>Amostra</b>	<b>d<sub>50</sub> [μm]</b>
12	13506422	2	1	1	30,49
12	13506422	2	1	2	29,89
12	13506422	2	1	3	30,54
12	13506422	4	2	4	31,37
12	13506422	4	2	5	31,24
12	13506422	4	2	6	30,66
12	13506422	6	3	7	28,42
12	13506422	6	3	8	28,31
12	13506422	6	3	9	28,74
12	13506422	8	4	10	32,03
12	13506422	8	4	11	31,69
12	13506422	8	4	12	31,59
12	13506422	10	5	13	29,76
12	13506422	10	5	14	30,26
12	13506422	10	5	15	30,49

## ANEXO 5 – Resultados tabelados ANOVA / DOE

Dados OFAT											
Moinho	Material	A - Abert. tela da peneira [μm]	B - Rotação do Classificador [m/s]	C - Rotação do disco de moagem [m/s]	D - Rotação da rosca de alimentação [RPM]	E - Rotação do dosador de fluidizante [s <sup>-1</sup> ]	F - Vazão de ar [m <sup>3</sup> /min]	Tratamento	Amostra	d <sub>50</sub> [μm]	Média d <sub>50</sub> [μm]
12	13506422	74	15	85	7	0,55	60	1	1	35,44	35,82
12	13506422	74	15	85	7	0,55	60	1	2	35,46	
12	13506422	74	15	85	7	0,55	60	1	3	36,57	
12	13506422	74	15	85	30	1,5	75	2	4	35,70	35,54
12	13506422	74	15	85	30	1,5	75	2	5	35,48	
12	13506422	74	15	85	30	1,5	75	2	6	35,45	
12	13506422	74	15	119	7	1,5	75	3	7	34,23	33,47
12	13506422	74	15	119	7	1,5	75	3	8	33,42	
12	13506422	74	15	119	7	1,5	75	3	9	32,76	
12	13506422	74	15	119	30	0,55	60	4	10	27,41	27,83
12	13506422	74	15	119	30	0,55	60	4	11	28,13	
12	13506422	74	15	119	30	0,55	60	4	12	27,94	
12	13506422	74	28	85	7	1,5	60	5	13	29,63	29,57
12	13506422	74	28	85	7	1,5	60	5	14	29,81	
12	13506422	74	28	85	7	1,5	60	5	15	29,28	
12	13506422	74	28	85	30	0,55	75	6	16	30,76	29,92
12	13506422	74	28	85	30	0,55	75	6	17	29,67	
12	13506422	74	28	85	30	0,55	75	6	18	29,32	
12	13506422	74	28	119	7	0,55	75	7	19	22,54	23,18
12	13506422	74	28	119	7	0,55	75	7	20	22,72	
12	13506422	74	28	119	7	0,55	75	7	21	24,29	
12	13506422	74	28	119	30	1,5	60	8	22	23,70	24,27
12	13506422	74	28	119	30	1,5	60	8	23	24,93	
12	13506422	74	28	119	30	1,5	60	8	24	24,19	
12	13506422	125	15	85	7	0,55	75	9	25	55,71	56,83
12	13506422	125	15	85	7	0,55	75	9	26	58,57	
12	13506422	125	15	85	7	0,55	75	9	27	56,21	
12	13506422	125	15	85	30	1,5	60	10	28	55,71	57,19
12	13506422	125	15	85	30	1,5	60	10	29	57,84	
12	13506422	125	15	85	30	1,5	60	10	30	58,02	
12	13506422	125	15	119	7	1,5	60	11	31	48,32	47,88
12	13506422	125	15	119	7	1,5	60	11	32	48,87	
12	13506422	125	15	119	7	1,5	60	11	33	46,44	
12	13506422	125	15	119	30	0,55	75	12	34	40,64	40,66
12	13506422	125	15	119	30	0,55	75	12	35	40,39	
12	13506422	125	15	119	30	0,55	75	12	36	40,95	
12	13506422	125	28	85	7	1,5	75	13	37	38,85	38,23
12	13506422	125	28	85	7	1,5	75	13	38	38,08	
12	13506422	125	28	85	7	1,5	75	13	39	37,75	
12	13506422	125	28	85	30	0,55	60	14	40	29,23	29,68
12	13506422	125	28	85	30	0,55	60	14	41	29,67	
12	13506422	125	28	85	30	0,55	60	14	42	30,14	
12	13506422	125	28	119	7	0,55	60	15	43	27,36	27,73
12	13506422	125	28	119	7	0,55	60	15	44	27,40	
12	13506422	125	28	119	7	0,55	60	15	45	28,42	
12	13506422	125	28	119	30	1,5	75	16	46	29,31	29,66
12	13506422	125	28	119	30	1,5	75	16	47	29,71	
12	13506422	125	28	119	30	1,5	75	16	48	29,97	