

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Instituto de Química
Química Industrial

Ricardo Peruffo Richter

**Estudo da combinação de diâmetros de esferas de óxido
de zircônio para otimização do processo de moagem de
concentrados industriais base solvente**

Porto Alegre

2024

Ricardo Peruffo Richter

Estudo da combinação de diâmetros de esferas de óxido de zircônio para otimização do processo de moagem de concentrados industriais base solvente

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Química Industrial do Instituto de Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
Orientadora: Profa. Dra. Daniele Trajano Raupp

Porto Alegre
2024

FICHA CATALOGRÁFICA

CIP - Catalogação na Publicação

Richter, Ricardo Peruffo

Estudo da combinação de diâmetros de esferas de óxido de zircônio para otimização do processo de moagem de concentrados industriais base solvente / Ricardo Peruffo Richter. -- 2024.

55 f.

Orientadora: Daniele Trajano Raupp.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Química, Curso de Química Industrial, Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. Produção de tintas. 2. Moagem de pigmentos. 3. Moinho de esferas. 4. Concentrado de pigmento. 5. Otimização de processo. I. Raupp, Daniele Trajano, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

Ricardo Peruffo Richter

Estudo da combinação de diâmetros de esferas de óxido de zircônio para otimização do processo de moagem de concentrados industriais base solvente

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Química Industrial do Instituto de Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
Orientadora: Dra. Daniele Trajano Raupp

Aprovada em: Porto Alegre, 12 de agosto de 2024.

BANCA EXAMINADORA:

Fernanda Trindade Gonzalez Dias
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Eliana Weber de Menezes
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Legna Andreina Colina Vegas
Comissão de Extensão - COMEXT

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a **Deus** por me fornecer saúde e energia para conseguir superar todos os desafios e concluir esta etapa.

À minha família, por sempre me ensinar a “me virar” e servir de suporte para que eu conseguisse cumprir meus objetivos.

Um agradecimento especial à família Hennemann, por ser minha segunda família e me fazer sentir parte dela.

Aos meus amigos, por todas as noites e momentos de descontração, que renovaram meus ânimos muitas vezes.

À Priscila, meu amor e companheira que suportou minhas variações de humor, meus cansaços e minhas reclamações. Obrigado pelo companheirismo, você foi fundamental. Eu te amo.

Aos meus professores, por todos os ensinamentos compartilhados ao longo da graduação, que fazem esta Universidade ter elevado nível e ser tão conceituada.

À COMGRAD, por todo suporte que precisei em momentos complicados.

Aos grandes líderes profissionais que tive pela vida, que sempre exigiram muito de mim e acreditaram no meu potencial, nunca permitindo que eu “baixasse o nível”.

Por último, mas não menos importante, a mim, por todo esforço, horas de autorreflexão, dedicação e força de vontade. O eu de hoje está orgulhoso.

*“Sonhos sem metas são apenas sonhos,
e eles acabam alimentando a decepção.
No caminho para alcançar seus sonhos,
você deve aplicar disciplina,
mas mais importante, consistência.
Porque sem comprometimento,
você nunca começará,
mas sem consistência,
você nunca terminará.”*

Denzel Washington

RESUMO

O presente estudo objetiva investigar os efeitos do tamanho de esferas utilizadas no processo de moagem de concentrados e da combinação destes tamanhos na eficiência do processo de moagem de um concentrado de pigmento laranja, base solvente, utilizado em tintas industriais. O Projeto Tecnológico possui caráter extensionista e foi desenvolvido em parceria com uma indústria de tintas, que tem como necessidade de melhoria, a otimização dos processos de moagem em termos de tempo de processo. A metodologia desenvolvida envolveu a preparação de um concentrado aldeídico com alto teor de pigmento laranja de molibdênio, que foi disperso em *cowles* e moído em moinho vertical, em escala laboratorial. Foram utilizadas esferas de três diâmetros diferentes (0,8 mm, 1,0 mm e 1,2 mm), tanto individualmente quanto em combinações, para avaliar a eficiência da moagem. A medida de eficiência dos processos se deu através de análises de granulometria e força de tingimento, utilizando grindômetro e espectrofotômetro por reflexão. Análises complementares de granulometria serão realizadas em breve para comparar o a precisão do grindômetro com um analisador de tamanho de partículas por difração de raios x. Os resultados mostraram que a combinação de diferentes diâmetros de esferas resultou em uma moagem mais eficiente, reduzindo o tamanho das partículas de pigmento e aumentando o poder tintorial dos concentrados. Especificamente, a amostra que utilizou uma combinação de esferas com maior quantidade do tamanho de 0,8 mm apresentou os melhores resultados, com uma distribuição mais uniforme das partículas e maior força de tingimento. O estudo mostrou que a combinação dos tamanhos das esferas de moagem tem um impacto significativo na eficiência do processo de produção. A otimização do processo de moagem, portanto, apresenta-se como uma estratégia eficaz para aprimorar a produção de concentrados de pigmento, oferecendo benefícios relevantes para a indústria de tintas. Este estudo pode servir como base para futuras pesquisas que explorem a aplicação desta metodologia em outros tipos de pigmentos e resinas, visando validar a os resultados obtidos.

Palavras-chave: Produção de tintas. Moagem. Concentrados de pigmento. Força de tingimento. Esferas de zircônio. Otimização de processos. Moinho de esferas.

ABSTRACT

This work aims to investigate the effects of the size of spheres used in the milling process of concentrates and the combination of these sizes on the efficiency of the milling process of an orange pigment concentrate, solvent-based, used in industrial paints. The Technological Project has an extensionist character and was developed in partnership with a paint industry, which has a need for improvement in optimizing the milling processes in terms of process time. The developed methodology involved preparing an aldehyde-based concentrate with high molybdenum orange pigment content, which was dispersed in a Cowles blade and milled using a vertical mill at a laboratory scale. Beads of three different diameters (0.8 mm, 1.0 mm, and 1.2 mm) were used, both individually and in combinations, to assess milling efficiency. Efficiency was measured through granulometry and tinting strength analyses, utilizing a grindometer and a reflectance spectrophotometer. Additional granulometry analyses will be conducted to compare the precision of the grindometer with a particle size analyzer using X-ray diffraction. The results demonstrated that the combination of different bead diameters led to more efficient milling, reducing the pigment particle size and increasing the tinting strength of the concentrates. Specifically, the sample using a combination with a higher proportion of 0.8 mm beads showed the best results, with a more uniform particle distribution and greater tinting strength. The study revealed that the combination of milling bead sizes has a significant impact on production process efficiency. Therefore, process optimization appears to be an effective strategy for enhancing pigment concentrate production, offering relevant benefits to the paint industry. This study may serve as a foundation for future research exploring the application of this methodology to other types of pigments and resins, aiming to validate the obtained results.

Keywords: Paint Production, Milling Process, Pigment Concentrates, Tinting Strength, Zirconia Beads, Process Optimization. Bead mill.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Morfologia dos pigmentos | 16 |
| Figura 2 - Cadeia produtiva da fabricação de tintas | 17 |
| Figura 3 - Dispensor industrial tipo cowles..... | 18 |
| Figura 4 - Ilustração com exemplo de um moinho vertical com esferas | 19 |
| Figura 5 - Eficiência óptica e tamanho de partícula..... | 19 |
| Figura 6 - Processo de floculação do pigmento laranja de molibdato | 21 |
| Figura 7 - Variações de força de tingimento em concentrados | 22 |
| Figura 8 - Equipamento grindômetro e exemplos de análises..... | 23 |
| Figura 9 - Analisador de tamanho de partícula por difração a laser | 24 |
| Figura 10 - Moagem do concentrado laranja de molibdato | 29 |
| Figura 11 - Comparativo visual entre os diferentes tamanhos de esferas..... | 30 |
| Figura 12 - Vista superior do Grindômetro com escala de 6 a 8 hegman | 33 |
| Figura 13 - Aplicador automático com vácuo para extensores..... | 34 |
| Figura 14 - Espectrofotômetro X-Rite modelo Ci4200..... | 35 |
| Figura 15 - Grau de dispersão 0 hegman..... | 36 |
| Figura 16 - Grau de dispersão 7,5 hegman..... | 37 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1 - Análise de granulometria das amostras..... | 39 |
| Gráfico 2 - Análise do teor de sólidos..... | 41 |
| Gráfico 3 - Resultados de granulometria e teor de sólidos do primeiro passe | 43 |
| Gráfico 4 - Resultados de granulometria e teor de sólidos do segundo passe | 44 |
| Gráfico 5 - Resultados de granulometria e teor de sólidos do terceiro passe | 46 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Formulação do concentrado laranja de molibdato | 27 |
| Tabela 2 - Lista de experimentos realizados e condições de processo | 30 |
| Tabela 3 – Análise granulométrica das amostras..... | 37 |
| Tabela 4 – Teor de sólidos das amostras após moagem..... | 40 |
| Tabela 5 – Teor de sólidos das amostras após moagem..... | 47 |
| Tabela 6 – Força de tingimento das amostras | 48 |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 2 | OBJETIVOS | 14 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 3.1 | REVESTIMENTOS ORGÂNICOS | 15 |
| 3.2 | PROCESSO PRODUTIVO | 17 |
| 3.3 | CONTROLE DE QUALIDADE | 20 |
| 3.3.1 | Força de Tingimento | 21 |
| 3.3.2 | Granulometria | 22 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS | 25 |
| 4.1 | ATIVIDADE EXTENSIONISTA | 25 |
| 4.2 | PREPARAÇÃO DOS CONCENTRADOS | 26 |
| 4.2.1 | Formulação e tecnologia | 26 |
| 4.2.2 | Produção das amostras | 27 |
| 4.2.2.1 | Preparação do veículo | 27 |
| 4.2.2.2 | Processo de dispersão | 28 |
| 4.2.2.3 | Processo de moagem | 28 |
| 4.3 | ANÁLISES DAS AMOSTRAS | 31 |
| 4.3.1 | Teor de sólidos | 31 |
| 4.3.2 | Análise de granulometria | 32 |
| 4.3.2.1 | Grindômetro | 32 |
| 4.3.2.2 | Difração à Laser | 33 |
| 4.3.3 | Força de tingimento | 34 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 36 |
| 5.1 | ANÁLISES DE GRANULOMETRIA | 36 |
| 5.2 | ANÁLISES DE TEOR DE SÓLIDOS | 40 |
| 5.2.1 | Primeiro passe no moinho | 41 |
| 5.2.2 | Segundo passe no moinho | 43 |
| 5.2.3 | Terceiro passe no moinho | 45 |
| 5.2.4 | Correção do teor de sólidos | 46 |
| 5.3 | ANÁLISE DE FORÇA DE TINGIMENTO | 47 |
| 6 | IMPACTOS DA ATIVIDADE EXTENSIONISTA | 51 |
| 7 | CONCLUSÕES | 52 |

| | |
|------------------|----|
| REFERÊNCIAS..... | 54 |
|------------------|----|

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é considerado um dos cinco maiores produtores mundiais de tintas, sendo composto por centenas de fabricantes de grande, médio e pequeno porte espalhados por todo o território nacional. O mercado brasileiro tem registrado um crescimento significativo nos últimos anos, sendo que em 2023 foram produzidos 1,87 bilhões de litros, e 19% deste volume é ocupado pelo segmento de tintas industriais (ABRAFATI, 2024). Os revestimentos orgânicos protetivos, conhecidos como tintas, são amplamente utilizados em setores industriais, como automotivo, agrícola, rodoviário, aeroespacial, equipamentos industriais, indústria geral, entre outros. São principalmente aplicados em substratos metálicos, para proporcionar controle de corrosão, durabilidade, resistência a altas temperaturas, resistência química e resistência a riscos, além de embelezar os equipamentos.

A produção destes revestimentos pode conter etapas complicadas e demoradas. Uma maneira de agilizar o processo produtivo é através do sistema de fabricação modular, que prepara intermediários em maior escala, facilitando a produção conforme as demandas (Sousa, 2017). Um importante intermediário são os concentrados de pigmentos, uma formulação com alta concentração de pigmentos, que passa por uma etapa de dispersão seguida de um processo de moagem. A produção de concentrados costuma ser crítica, seu processo produtivo é lento e possui muitos controles, pois são utilizados na fabricação de diversos outros produtos.

No contexto atual das indústrias de tintas, o processo de moagem desempenha um papel crucial na produção eficiente e de alta qualidade. Entretanto, esta etapa muitas vezes é o gargalo do processo produtivo, pois para que se obtenha o grau de dispersão desejado do revestimento, são necessários vários passes pelo moinho, e isto impacta em aspectos de qualidade e produtividade da indústria (Cenci, 2022). Uma moagem eficiente é essencial para garantir que as propriedades físicas e químicas da tinta atinjam os padrões desejados de desempenho e durabilidade. No entanto, vários desafios podem surgir durante o processo de moagem, incluindo a necessidade de controle preciso da granulometria, o uso eficiente de energia e a correta parametrização do equipamento (Tahara *et al.*, 2014).

Otimizar o processo de moagem pode resultar em ganhos de energia, diminuição nos custos de produção e aumento da qualidade do produto (Breitung-Faes; Kwade, 2013). Os elementos de moagem, também chamados de esferas, desempenham um papel fundamental no processo de moagem, pois são os responsáveis por desaglomerar as partículas de pigmentos para que se obtenha a máxima performance desta matéria-prima. A seleção correta dos diâmetros destas esferas pode impactar diretamente na eficiência energética do processo (Postma *et al.*, 2017) e, conseqüentemente, no tempo necessário para se atingir o tamanho de partículas desejado.

O estudo das variáveis envolvidas no processo de moagem torna-se, portanto, uma área de interesse fundamental para a indústria de tintas. Além disso, considerando o impacto positivo que a otimização deste processo pode trazer, seja através da redução de custos ou do aumento da capacidade produtiva através de processos mais eficientes, torna-se evidente a relevância deste estudo para o setor industrial como um todo. Neste sentido, este trabalho busca compreender o impacto de diferentes diâmetros de esferas na eficiência do processo de moagem e os efeitos nas propriedades de um concentrado industrial base solvente. A medida da eficiência do processo ocorreu pela análise do tamanho das partículas de pigmento após a moagem e do poder tintorial dos concentrados.

O estudo foi realizado no laboratório de pesquisa e desenvolvimento em uma indústria de tintas, do estado do Paraná, voltada a soluções de alto desempenho e tecnologia em revestimentos industriais. Como a investigação consiste na otimização de uma das etapas do processo produtivo da indústria de tintas, esse Projeto Tecnológico tem caráter extensionista e foi baseado no seguinte problema: Quais os efeitos do tamanho de esferas utilizadas no processo de moagem de concentrados e da combinação destes tamanhos na eficiência do processo de moagem de um concentrado de pigmento laranja, base solvente, utilizado em tintas industriais?

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é investigar os efeitos do tamanho de esferas utilizadas no processo de moagem de concentrados e da combinação destes tamanhos na eficiência do processo de moagem de um concentrado de pigmento laranja, base solvente, utilizado em tintas industriais.

Para a realização deste estudo, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- a) Analisar a eficiência do processo de moagem utilizando 3 diferentes diâmetros de esferas de óxido de zircônio estabilizadas com cério de 0,8 mm, 1,0 mm e 1,2 mm.
- b) Comparar o desempenho individual das esferas no processo de moagem com a combinação destes diâmetros, através de análises de granulometria e força de tingimento.
- c) Verificar a precisão do método convencional de análise de granulometria realizada com o equipamento grindômetro, comumente utilizado nas indústrias de tintas, quando comparado a um analisador de tamanho de partículas por difração à laser (PSA).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 REVESTIMENTOS ORGÂNICOS

O termo "revestimento" abrange uma série de categorias quando falamos sobre tintas, como esmaltes, lacas, vernizes, primers, seladores e muitos outros (Lambourne; Strivens, 1999). Os revestimentos orgânicos, comumente chamados de tintas, são misturas que possuem sua composição líquida, geralmente viscosa. São constituídos de um ou mais pigmentos e cargas dispersos em um aglomerante líquido, conhecido como resina, em que ao sofrer um processo de cura, forma um filme aderente ao substrato (Fazenda, 2009). A principal função dos revestimentos orgânicos, no ramo industrial, é a proteção dos substratos à ação corrosiva do ambiente. Para que este revestimento tenha esta finalidade, é fundamental que possua características como resistência à corrosão e à radiação pois são os principais agentes de degradação do substrato e da película protetiva.

Concentrados de pigmentos, por outro lado, têm a finalidade de aumentar a flexibilidade produtiva, uma vez que o processo produtivo de uma tinta industrial passa por processos complexos que demandam tempo, energia e inspeção para que os parâmetros das tintas atendam as especificações determinadas. Os concentrados podem ser produzidos com diferentes pigmentos de cores, aumentando a gama de cores possíveis de fabricação dos revestimentos, o que torna seu uso de fundamental interesse para a indústria, uma vez que se reduz o tempo de produção eliminando as etapas lentas do processo fabril.

Dentre os componentes constituintes de uma tinta, a resina tem papel fundamental, pois é responsável por praticamente todas as propriedades mecânicas do filme protetivo. É constituída por um polímero orgânico que após ser aplicado sobre um substrato, mantém os outros componentes do revestimento suspensos e é responsável pela formação da película protetiva (Jones; Nichols; Pappas, 2017). O filme formado é responsável por conferir ao substrato boa aparência, proteção e aumento de durabilidade. A qualidade do revestimento e sua capacidade de proteção estão diretamente relacionadas ao tipo de resina utilizada na formulação da tinta (Batista, 2004).

Os solventes são líquidos, voláteis e são responsáveis por uma série de propriedades das tintas, mas suas principais funções são a capacidade de dissolver a

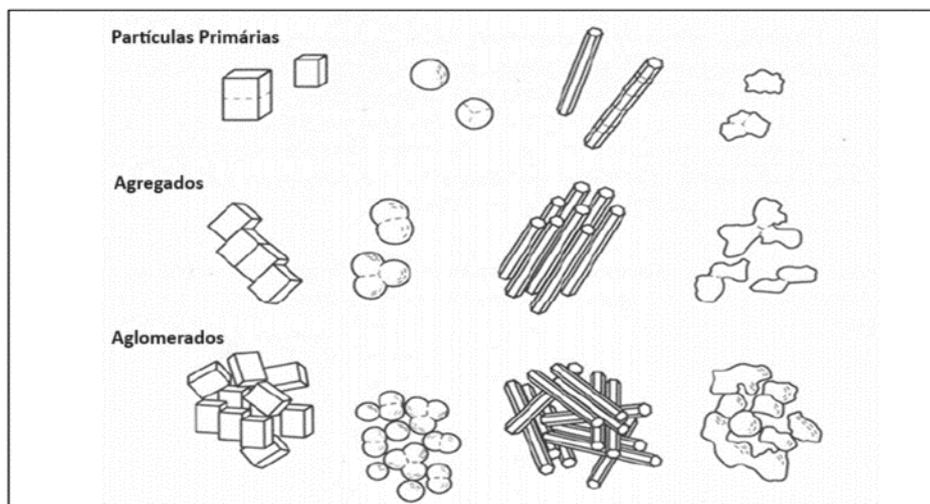
resina, gerar fluidez ao sistema durante o processo de fabricação e pelas propriedades de aplicabilidade. Adicionalmente, os solventes são escolhidos de acordo com a resina utilizada, considerando principalmente a solvência do sistema, pois precisam ser compatíveis com o meio (Jhamb *et al.*, 2020).

Os aditivos são responsáveis por proporcionar características especiais ou melhorar as propriedades principais dada pelos demais materiais da formulação, como as resinas, pigmentos e solventes. Por exemplo, com o uso de pequenas quantidades, geralmente menor do que 1%, é possível melhorar a manufatura, estabilidade, aplicabilidade, presença de bolhas e espuma, qualidade, secagem, conservação, resistência a intempéries e aspecto do filme (Fazenda, 2009).

Os pigmentos são partículas sólidas, insolúveis, que possuem tamanhos de partículas que variam entre nanômetros até centenas de micrômetros, que são dispersos na tinta e se mantêm em suspensão, a fim de conferir cor, opacidade ou alguma funcionalidade à tinta, como proteção anticorrosiva, aumento de reologia ou enchimento (Jones; Nichols; Pappas, 2017).

Pesquisas em microscopia óptica e eletrônica deram origem ao desenvolvimento de um modelo de partícula de pigmento que hoje constitui a base da norma DIN (EN ISO 18451-1) 53 206. De acordo com esse modelo (Figura 1), existem três tipos de partículas presentes em um pigmento: partículas primárias, agregados e aglomerados (Oyarzún, 2015).

Figura 1 - Morfologia dos pigmentos



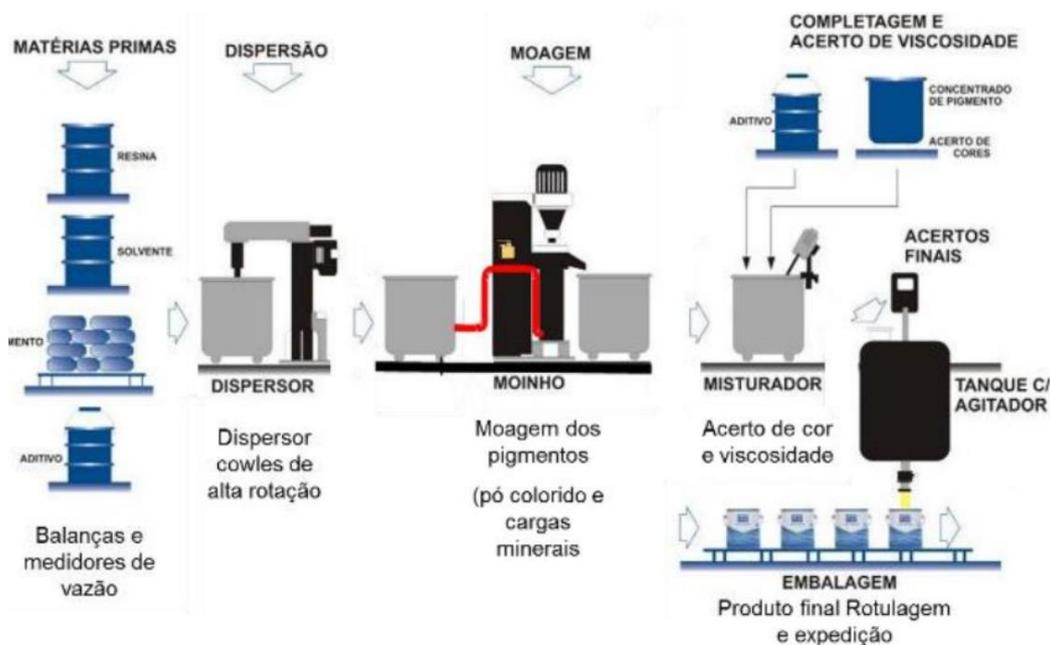
Fonte: Adaptado de EN ISO 18451-1

Dentre os pigmentos utilizados na fabricação de concentrado, os pigmentos laranja de molibdênio têm grande relevância e importância, devido às suas propriedades de alto poder de cobertura, força tintorial, cor intensa e resistência à luz. Estes pigmentos são compostos por uma mistura de cromato e molibdato de chumbo, com fórmula genérica $xPbCrO_4.yPbMoO_4$. O cromato traz ao pigmento uma coloração amarelada, enquanto o molibdato traz uma forte e intensa coloração avermelhada. Os pigmentos laranja de molibdênio não têm formulação definida, pois são uma mistura destas composições e podem variar consideravelmente conforme as condições de crescimento e precipitação dos cristais (Haber, 1994).

3.2 PROCESSO PRODUTIVO

O foco da fabricação de tintas é a dispersão e incorporação dos pigmentos no que se chama de veículo (mistura de resina, solvente e aditivos). Para isto, a cadeia produtiva é dividida nas seguintes etapas: pesagem das matérias primas, mistura, dispersão, moagem, completagem, controle de qualidade e envase.

Figura 2 - Cadeia produtiva da fabricação de tintas



Fonte: Peixoto (2016)

Inicialmente, as matérias primas são pesadas e parte do veículo é misturada juntamente com o pigmento, num processo chamado de umectação, que busca

facilitar a diminuição do tamanho dos aglomerados sólidos de pigmento, nas etapas seguintes. Após esta primeira incorporação, inicia-se o processo de dispersão, onde são utilizados dispersores especiais, chamados *cowles* (Figura 3). Este equipamento possui um disco dentado que gira em alta velocidade, causando atrito com os aglomerados de pigmento, a fim de promover uma redução no tamanho das partículas. Este processo de dispersão não é suficiente para diminuir o tamanho dos aglomerados num tamanho suficiente para que se tenha o máximo aproveitamento dos pigmentos, ou seja, partículas muito próximas ao tamanho das partículas primárias.

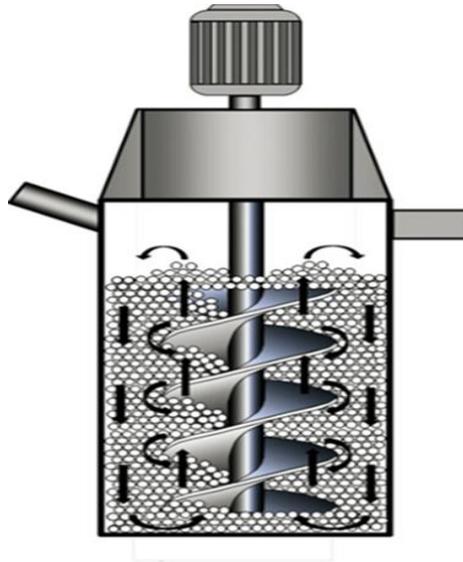
Figura 3 - Dispersor industrial tipo *cowles*



Fonte: Tong Hui, 2024

Ao finalizar o processo de dispersão, a tinta é encaminhada para o processo de moagem, onde as partículas sólidas de pigmento são finamente desagregadas, recebendo energia através de cisalhamento dentro da câmara de moagem. Os equipamentos utilizados são moinhos especiais para essa função, normalmente com fluxo vertical ou horizontal, que utilizam esferas como elemento de moagem, que podem variar de material e diâmetro (Figura 4). O processo de moagem ocorre até que o tamanho das partículas desejadas seja atingido.

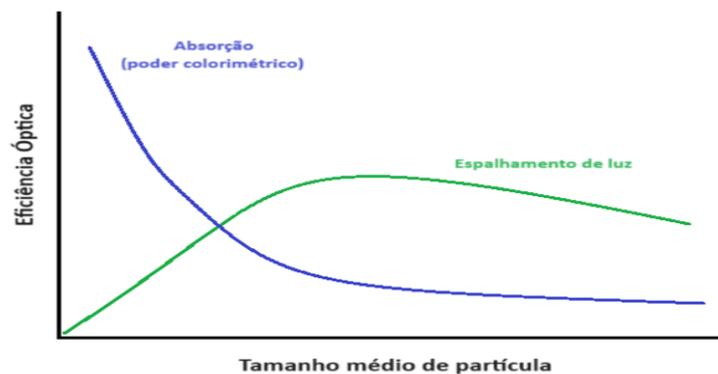
Figura 4 - Ilustração com exemplo de um moinho vertical com esferas



Fonte: adaptado de Gupta e Yan (2016)

Quanto menor o tamanho das partículas de pigmento, melhor aproveitamento de suas propriedades e o acabamento do filme formado (Figura 5), mas de modo geral o processo é interrompido quando o diâmetro médio das partículas de pigmento atinge tamanhos menores do que 5 micrômetros, porém preferencialmente menor que 1 micrômetro (Gueli, 2017). Diminuir o tamanho de partícula dos pigmentos significa desaglomeração das partículas, ou seja, a separação dos pigmentos de grandes blocos de partículas primárias em blocos menores, aumentando sua concentração no meio e resultando em uma cor mais intensa (alto poder colorimétrico, ou força de tingimento) e um maior espalhamento de luz.

Figura 5 - Eficiência óptica e tamanho de partícula



Fonte: adptado de Günthert, Hauser e Radtke (1989)

Após o processo de moagem, os demais componentes são adicionados e misturados, num processo chamado de completagem. O produto então passa pelo controle de qualidade para ajustes finos e controle das propriedades principais definidas e em seguida é envasado e está pronto para ser utilizado na fabricação de tintas ou comercializado.

3.3 CONTROLE DE QUALIDADE

O controle da qualidade é responsável por todas as inspeções realizadas em tintas e concentrados. Esta etapa é fundamental para inspecionar se todos os processos produtivos foram eficientes, garantindo a consistência e desempenho dos produtos. Para isto, diversos testes são realizados no produto final para garantir que as propriedades do produto estejam dentro das especificações determinadas (Gneco, 2009).

Em tintas, os testes mais comuns realizados são fineza, viscosidade, teor de sólidos, aderência, brilho, peso específico, estabilidade, cor e secagem. Já em concentrados, têm-se alguns testes comuns com tintas, como viscosidade e cor, mas o foco está no controle da fineza e do poder tintorial. Um comentário especial referente ao teste de poder tintorial é que ele é essencial para avaliar a capacidade do concentrado de pigmentos em absorver a luz incidente sobre ele, e conferir cor à tinta final (Oyarzún, 2015).

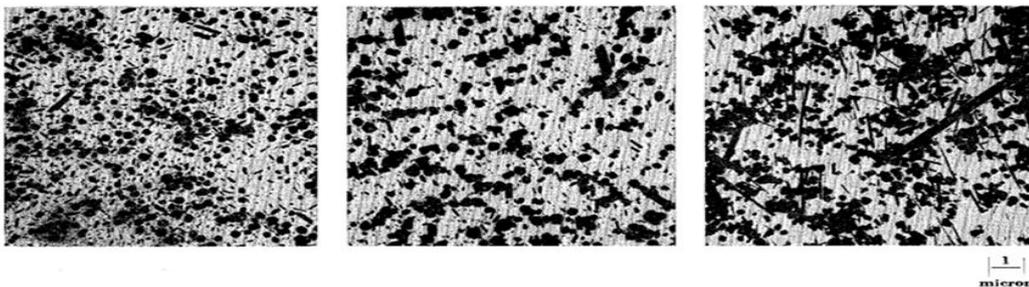
O poder tintorial não apenas indica a intensidade da cor, mas também sua capacidade de cobertura e opacidade. Um concentrado de pigmento com alto poder tintorial exigirá menos quantidade de produto para alcançar a mesma tonalidade de cor, o que pode resultar em economia de custos e melhoria na eficiência do processo de produção de tintas, uma vez que os concentrados possuem custo elevado.

Outro teste extremamente importante é o teste de fineza, que analisa a granulometria do concentrado e que está diretamente relacionado à qualidade da moagem dos pigmentos e ao tamanho de suas partículas presentes no meio. A dispersão e moagem eficaz dos pigmentos é crucial para garantir que a cor seja uniformemente distribuída na tinta, o que produzirá uma tonalidade de cor consistente e intensa. Quando as partículas de pigmento estão bem dispersas e finamente espalhadas pelo filme de tinta, elas terão uma maior área de superfície disponível para interagir com a luz, o que aumenta o poder tintorial do concentrado. Por outro lado,

partículas maiores ou aglomerados podem causar problemas de dispersão, levando a uma distribuição desigual da cor e à necessidade de usar mais concentrado de pigmentos para alcançar a mesma tonalidade.

Problemas de dispersão não apenas afetam o poder tintorial de um concentrado, mas também pode resultar em variações indesejadas na produção de tintas. Isto justifica a necessidade de uma boa estabilidade do pigmento no meio e de uma escolha inteligente dos aditivos dispersantes, pois estes garantem que após a dispersão dos pigmentos, estas partículas não voltem a aglomerar-se. Este defeito conhecido como floculação (Figura 6), identificado na etapa de controle da qualidade, onde se observa a diminuição do grau de fineza e pela diminuição do poder tintorial, resultado do aumento indesejado do tamanho médio das partículas já dispersas no meio.

Figura 6 - Processo de floculação do pigmento laranja de molibdato



Fonte: Adaptado de Hucle e Lalor (1955)

3.3.1 Força de Tingimento

A força de tingimento em concentrados é uma das principais propriedades controladas em um concentrado, pois diz respeito à capacidade de um pigmento em tingir o meio no qual é incorporado. A baixa variabilidade desta propriedade entre lotes de concentrados de pigmentos é fundamental, uma vez que a reprodutibilidade das fórmulas de tintas está diretamente ligada ao desempenho ou a força de tingimento do pigmento (Yoshida *et al.*, 2009). Corrigir problemas de força de tingimento é oneroso para processo e custoso, mas imprescindível, já que tintas produzidas a partir de concentrados de pigmentos com variações na força de tingimento terão diferenças em sua cor final (Figura 7).

Para a realização deste teste, uma massa de concentrado é adicionada e misturada a uma base branca padrão: uma mistura de resinas, solventes e aditivos contendo dióxido de titânio (pigmento branco) já disperso. À mistura deste concentrado com a base branca é dado o nome de “corte”. Feita esta mistura, o corte preparado é aplicado sobre uma cartela padronizada. Em seguida, após completa secagem da película, analisa-se o filme formado sobre esta cartela com auxílio de espectrofotômetro por refletância, que mede a capacidade deste concentrado de mudar a cor da base branca, através da intensidade da cor produzida pela mistura. O resultado da avaliação do poder tintorial é dado em percentual, e refere-se à sua intensidade de cor quando comparado com um referencial, que normalmente costuma ser o corte preparado com o concentrado padrão.

Figura 7 - Variações de força de tingimento em concentrados



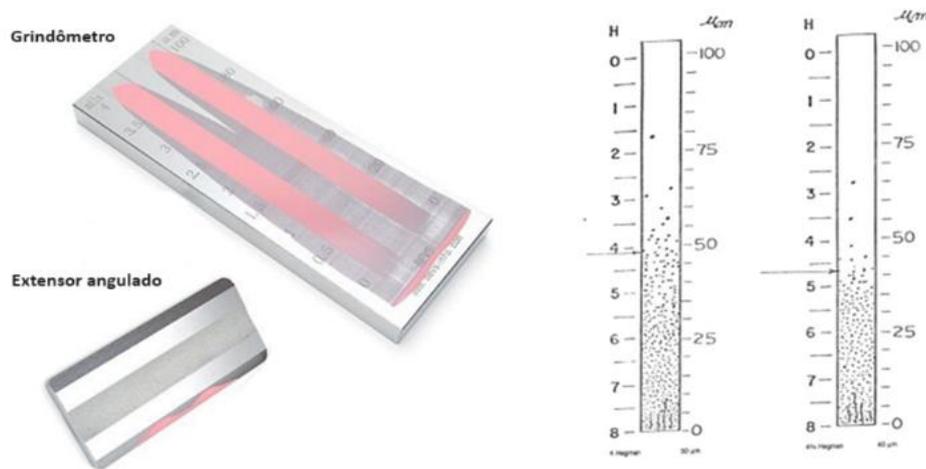
Fonte: Adaptado de RMA TECH (2024)

3.3.2 Granulometria

O método mais comum, amplamente utilizado nas indústrias de tintas para a inspeção do processo de moagem, utiliza um equipamento chamado grindômetro (Figura 8), que verifica o tamanho das partículas de pigmento conforme a metodologia ASTM D1210. Para realizar a análise, uma amostra da tinta ou concentrado é colocada na extremidade do aparelho que permite visualizar partículas maiores e, em seguida, com auxílio de um extensor angulado é arrastada até a outra extremidade, onde são visualizadas as partículas de tamanho menor. Para realizar a análise, o grindômetro é levado até o nível dos olhos buscando contraste da tinta com uma fonte

de luz, para que se possa observar em que ponto do equipamento, a amostra, ainda úmida, apresenta acúmulo de pontos de pigmentos visíveis a olho nu. Neste ponto é identificado o tamanho médio das partículas presentes no meio, que é o que chamamos de grau de dispersão, expresso em hegman ou micron, conforme está indicado no aparelho. Esta avaliação pode estar sujeita a erros, uma vez que depende da interpretação de cada avaliador, e bolhas de ar incorporadas durante o processo produtivo podem confundir o avaliador.

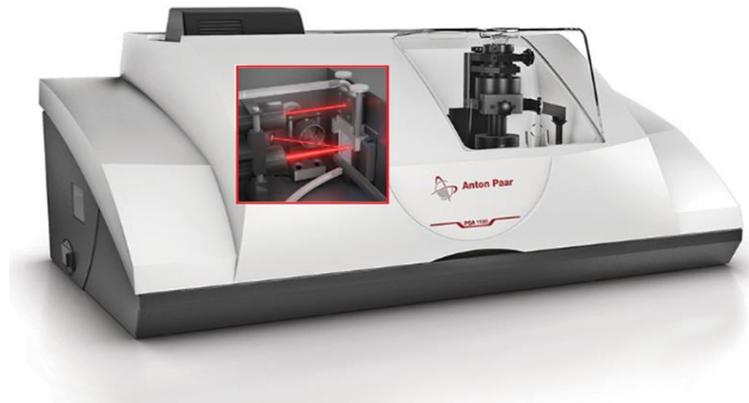
Figura 8 - Equipamento grindômetro e exemplos de análises



Fonte: adaptado de ASTM D1210

Outro método que pode ser utilizado consiste em utilizar um equipamento de difração a laser PSA 1190 (Figura 9), com alta precisão e capacidade de quantificar o tamanho das partículas do concentrado produzido. A análise consiste em colocar uma pequena quantidade de amostra previamente diluída no aparelho, a qual percorre uma tubulação até atravessar um feixe incidente de luz que passa sobre a amostra. O equipamento possui três sensores para detecção do tamanho das partículas, indicando o maior tamanho de partícula encontrado 90% das partículas no meio (D90). Quanto menores os valores de D90, menores são a maioria das partículas no meio analisado, o que significa um melhor processo de moagem.

Figura 9 - Analisador de tamanho de partícula por difração a laser



Fonte: Anton Paar (2024)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para desenvolver este trabalho, que tem por objetivo a avaliação e otimização do processo de moagem, serão produzidos concentrados laranja base solvente, variando e combinando os tamanhos das esferas utilizadas como agentes de moagem. A medida da eficiência do processo se dá pela análise do tamanho das partículas de pigmento e do poder tintorial do concentrado.

4.1 ATIVIDADE EXTENSIONISTA

A metodologia e execução deste projeto foi desenvolvida no laboratório de pesquisa e desenvolvimento de uma indústria de tintas, que fica na região de Curitiba, Paraná, na qual atuo desde 2022. Possuo 12 anos de experiência nesse ramo, atuando integralmente em laboratório de pesquisa e desenvolvimento de tintas industriais base solvente. Neste segmento, os processos de dispersão e moagem fazem parte do dia a dia, e com isto pude compreender a grande relevância deste processo na etapa produtiva, que muitas vezes era o gargalo da produção.

Combinado às habilidades de desenvolvimento de produto, um bom químico entende, valoriza e cuida do processo produtivo como uma etapa tão importante quanto a criação de novos produtos, uma vez que é a fábrica que traz resultado ao negócio de tintas, e é dali que buscamos maximizar os ganhos e diminuir as perdas, otimizando processos como o de moagem, por exemplo. Atualmente, apesar das inovações em tecnologia de equipamentos, a otimização do processo de moagem na indústria de tintas parceira continua sendo uma demanda importante.

Por conta disto, com o apoio da gerente e do coordenador, iniciei uma aproximação com a área produtiva, entrando em contato com os 2 profissionais do setor de planejamento de produção, o supervisor de produção e o gerente de produção, para propor um trabalho que pudesse otimizar esse processo, a fim de obtermos ganhos em escala industrial. Como já havia um histórico recente de ganhos que haviam sido realizados neste setor, que trouxeram grandes impactos em termos de controles e produtividade, a proposta foi muito bem aceita, pois primeiramente validaríamos a ideia em laboratório.

O público-alvo deste trabalho é principalmente a indústria de tintas parceira, através dos seguintes profissionais: 4 químicos de pesquisa e desenvolvimento e 2

profissionais do setor de planejamento de produção e seu gestor e o supervisor e gestor da área produtiva. Os resultados deste estudo foram compartilhados de maneira informal com todos os profissionais citados, e se os ganhos forem obtidos em escala industrial, pretende-se divulgar para a comunidade através de webinars, seminários, feiras ou congressos que costumam ocorrer ao longo de cada ano, para que se possa compartilhar o conhecimento adquirido. Até o momento nenhuma divulgação foi feita para fora da empresa onde se realizou o estudo.

4.2 PREPARAÇÃO DOS CONCENTRADOS

4.2.1 Formulação e tecnologia

Uma formulação otimizada de concentrado utilizando pigmento laranja de molibdato será utilizada. As principais matérias-primas utilizadas na formulação de concentrados são resinas, solventes, aditivos dispersantes e pigmento. Inicialmente prepara-se o que chamamos de veículo, uma mistura de resina, solvente e aditivo dispersante que é homogeneizada para receber o pigmento e iniciar o processo de dispersão e moagem.

A escolha das matérias-primas se dá principalmente pelo desempenho e compatibilidade e solvência dos sistemas. Como tecnologia de resina escolheu-se a aldeídica, pois é utilizada na fabricação dos chamados concentrados universais, devido a sua alta compatibilidade com outros sistemas de resina utilizadas na fabricação de tintas. O solvente definido para o sistema foi o acetato de etilglicol (2-etoxietil acetato), principalmente por conta da solvência da resina, numa quantidade que permita uma boa viscosidade do sistema. Para finalizar o veículo, foi selecionado um aditivo dispersante de alto desempenho, chamado hiperdispersante, indicado especialmente para concentrados base solvente.

O pigmento laranja de molibdênio foi utilizado por ser um pigmento de difícil processamento quando comparado aos demais pigmentos utilizados na fabricação de concentrados. Esta característica aumenta a criticidade do processo de moagem e conseqüentemente evidencia as diferenças de desempenho das esferas utilizadas.

Apesar do concentrado avaliado apresentar formulação genérica, por questões de sigilo e propriedade intelectual da empresa, as matérias-primas utilizadas presentes na Tabela 1, são descritas com nomes genéricos.

Tabela 1 - Formulação do concentrado laranja de molibdato

| Matéria-Prima | Percentual (%) | Massa (Kg) |
|----------------------|-----------------------|-------------------|
| Resina | 20,8 | 5,250 |
| Solvente | 3,0 | 0,750 |
| Aditivo dispersante | 4,7 | 1,175 |
| Pigmento | 65,0 | 16,250 |
| Solvente | 6,5 | 1,630 |
| Total | 100,0% | 25,000 |

Fonte: autoria própria.

O solvente total da formulação foi dividido em duas partes para otimização dos processos de dispersão e moagem, que serão detalhados e explicados nos tópicos a seguir.

4.2.2 Produção das amostras

A produção das amostras de concentrados foi realizada em uma única batelada, para evitar a variabilidade entre as amostras de matérias-primas, etapas de pesagem e variações de processo. Preparou-se inicialmente 14 litros de concentrado, para que fosse realizado uma única etapa de dispersão e, em seguida, a amostra já dispersa foi dividida em 5 recipientes com 2,5 litros de concentrado cada. Em seguida, as amostras foram direcionadas para o processo de moagem, onde cada uma destas amostras foi moída com 1, 2 e 3 passes no moinho, utilizando um tamanho específico de esferas. Para avaliar a eficiência do processo, foram coletadas amostras em cada passe do moinho, e as amostras foram comparadas entre si e com a amostra que não passou pelo processo de moagem. O processo de preparação das amostras está detalhado nos tópicos abaixo.

4.2.2.1 Preparação do veículo

Em um recipiente de volume adequado para o processo de dispersão, seguindo os parâmetros recomendados pela ABRAFATI, pesou-se a resina, o solvente inicial e o aditivo dispersante. Em seguida, levou-se o recipiente até o equipamento *cowles*, para homogeneização das matérias-primas, por 5 minutos a 800 rpm. O veículo então está preparado e pronto para receber o pigmento laranja.

4.2.2.2 Processo de dispersão

Após preparação do veículo, o processo avança para etapa de dispersão. Nesta etapa, o pigmento previamente pesado em embalagem separada, foi adicionado sob agitação, mantendo a formação de vórtex da mistura, para aumentar a eficiência de sua incorporação. Após completa adição, aguardou-se 10 minutos para que o pigmento fosse incorporado de maneira homogênea no veículo e, em seguida, aumentou-se a rotação para 1800 rpm por 30 minutos para realizar a dispersão do concentrado. Ao final deste tempo, tem-se um concentrado viscoso com o pigmento “pré-disperso”. Adiciona-se então o restante do solvente da formulação para ajuste da viscosidade e fluidez do concentrado para a etapa de moagem.

Com a etapa de dispersão concluída, o concentrado foi dividido em 5 recipientes, cada um contendo 2,5 L de concentrado. Uma amostra desta etapa também foi coletada, para verificar qual fineza e força de tingimento consegue-se atingir sem realizar a moagem do concentrado. Esta amostra será comparada com os demais concentrados moídos.

4.2.2.3 Processo de moagem

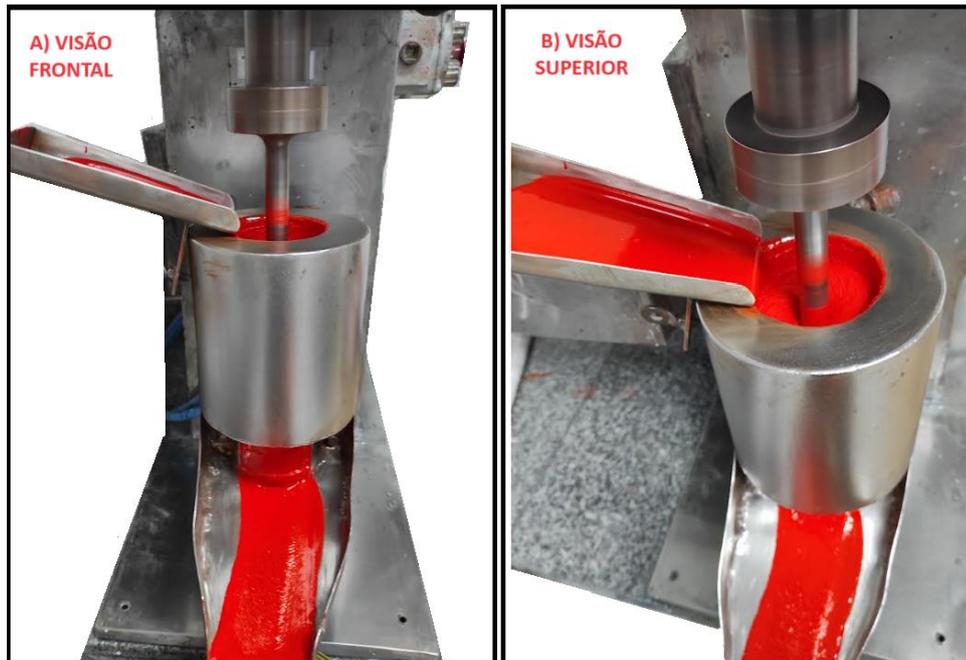
Após o processo de dispersão em *cowles*, inicia-se a preparação do moinho vertical para que as amostras sejam moídas. O equipamento possui uma câmara de moagem de 1,6 L, e 70% deste volume (recomendação do fabricante) precisa ser preenchido com as esferas de tamanho desejado. Com auxílio de um béquer, mediuse 1,12 L de esferas, adicionou-se à câmara de moagem e em seguida, iniciou-se a moagem da primeira amostra.

O procedimento de moagem utilizando moinho vertical (Figura 10) consiste em alimentar o equipamento com o concentrado através de uma rampa na parte superior esquerda, deixando-o escoar até a câmara de moagem, onde encontram-se as esferas. O eixo do motor do moinho possui 3 discos distribuídos verticalmente pela câmara de moagem, que faz com que todas as esferas girem uniformemente, causando o processo de cisalhamento no concentrado, separando os aglomerados de pigmento até que a fineza desejada seja obtida.

Ao percorrer toda a câmara de moagem, o concentrado escoar com a força da gravidade até a parte inferior do moinho, atravessando uma tela vazada com diâmetro de aproximadamente 0,5 mm, e é coletada em outro recipiente. Neste momento,

considera-se finalizado 1 ciclo ou passe no moinho. Ao final de cada passe, costuma-se avaliar a granulometria obtida através do teste de fineza e, caso o parâmetro não seja atingido, o concentrado retorna para o moinho para realizar mais um passe, e isto se repete até que se obtenha a fineza desejada.

Figura 10 - Moagem do concentrado laranja de molibdato



Fonte: autoria própria

Para cada tamanho de esfera serão realizados 3 passes no moinho. Desta maneira, cada concentrado irá gerar 3 amostras, um para cada passe no equipamento. Isso permitirá que se realize análises de força de tingimento e tamanho de partículas a cada passe no moinho e com cada tamanho de esferas utilizado, permitindo comparar as eficiências de moagem e o número mínimo de passes necessários para se atingir uma granulometria adequada.

A Tabela 2 descreve todos os tamanhos de esferas utilizados, suas combinações e condições de processo em que as amostras de concentrado serão avaliadas.

Tabela 2 - Lista de experimentos realizados e condições de processo

| Experimento | Esferas 0,8 mm | Esferas 1,0 mm | Esferas 1,2 mm | Número de passes |
|-------------|----------------|----------------|----------------|------------------|
| 1A | 100% | - | - | 1 |
| 2A | - | 100% | - | 1 |
| 3A | - | - | 100% | 1 |
| 4A | 50% | 30% | 20% | 1 |
| 5A | 20% | 30% | 50% | 1 |
| 1B | 100% | - | - | 2 |
| 2B | - | 100% | - | 2 |
| 3B | - | - | 100% | 2 |
| 4B | 50% | 30% | 20% | 2 |
| 5B | 20% | 30% | 50% | 2 |
| 1C | 100% | - | - | 3 |
| 2C | - | 100% | - | 3 |
| 3C | - | - | 100% | 3 |
| 4C | 50% | 30% | 20% | 3 |
| 5C | 20% | 30% | 50% | 3 |

Fonte: autoria própria.

A Figura 11 permite comparar visualmente a diferença entre os tamanhos de esferas, utilizadas para realizar os experimentos listados.

Figura 11 - Comparativo visual entre os diferentes tamanhos de esferas



Fonte: autoria própria

4.3 ANÁLISES DAS AMOSTRAS

Após preparação dos concentrados, as análises de granulometria e força de tingimento dos concentrados irão gerar dados que permitirá indicar qual dos experimentos obteve maior eficiência no processo de moagem. Entretanto, como a produção de tintas é um processo aberto, perdas de solvente vão ocorrendo durante o processo, mudando a concentração do pigmento no meio. É comum que ao final da produção e antes de iniciarmos as análises, principalmente de força de tingimento, este solvente que foi perdido durante a fabricação seja repostado para a fórmula, para que todas as amostras estejam com a mesma concentração de pigmento. Isto garante uma comparação correta entre as amostras, pois variações dos teores de sólidos levam a resultados incorretos e induzem ao erro das análises.

4.3.1 Teor de sólidos

Através deste teste conseguimos conhecer o total de matéria sólida existente e o total de matéria volátil. É uma característica muito importante a ser controlada e ajustada principalmente por estar impactar diretamente nos resultados de força de tingimento, que avalia o quanto uma massa de concentrado pesada contendo pigmento laranja, têm impacto na cor de uma base branca. Se duas amostras possuem teor de sólidos diferentes e pesamos a mesma massa, estamos utilizando quantidades diferentes de pigmentos e isso pode causar erro na interpretação dos resultados. Por conta disto, ao final do processo produtivo deve-se analisar o teor de sólidos dos concentrados produzidos, e ajustá-los para o valor teórico da formulação. Como conhecemos o teor de sólidos de cada matéria-prima utilizada, é possível ajustar o teor de sólidos do concentrado, ou seja, repor à formulação o solvente que foi perdido durante o processo, principalmente por conta do aquecimento resultante dos processos de dispersão e moagem.

Para realizar este teste, faz-se um 'molde' com papel-alumínio, para pesagem das amostras. O molde deve ser pesado em balança analítica, e em seguida, deve-se pesar uma massa de concentrado de 1 a 2g. Para este concentrado, deixou-se cada amostra durante 30 minutos a uma temperatura de 150°C em estufa, para evaporação dos solventes. Após transcorrido o tempo necessário, as amostras são retiradas da

estufa, e colocadas em um dessecador, para evitar absorver umidade do ar, causando desvio na análise.

O teste foi realizado em triplicata para minimizar erros e considerou-se a média dos resultados. O cálculo final é realizado da seguinte maneira:

$$\text{Teor sólidos: } \frac{Mfa - Mf}{Ma} * 100\%$$

Sendo Mfa a massa final da amostra seca com o molde, Mf a massa do molde e Ma a massa de amostra pesada. O resultado é expresso em percentual mássico e a correção é feita com o mesmo solvente utilizado na formulação.

4.3.2 Análise de granulometria

Durante a fabricação dos concentrados, após cada passe no moinho foi retirada uma amostra para realizar as análises de granulometria. Ao todo foram geradas 16 amostras para análise de granulometria, sendo 15 dos processos de moagem com diferentes esferas e uma do processo de dispersão. Neste trabalho pretende-se comparar dois métodos de análise de granulometria: o primeiro pelo modo convencional que utiliza um grindômetro, e um segundo modo por difração à laser, buscando comparar a precisão e qualidade de informações obtidas com cada análise.

4.3.2.1 Grindômetro

O grindômetro é um equipamento utilizado para determinar de visual o tamanho médio de partículas presentes em tintas e concentrados. Este aparelho possui uma escala, em hegman, que normalmente vai de 0 a 8, e outra escala em micrometros, sendo que 0 hegman equivale a 100 micrometros e 8 hegman equivale a 0 micrometros. A escala fica localizada na lateral do equipamento, e quanto maior o valor hegman encontrado, menor os tamanhos de partículas presente no meio.

As amostras de concentrados foram analisadas seguindo o procedimento ASTM D1210, que resumidamente consiste em colocar um pequeno volume de concentrado na extremidade de maior espessura do aparelho e em seguida, com auxílio de um extensor angulado, percorrer esta amostra até a outra de menor espessura. Imediatamente após utilizar o extensor, levou-se o equipamento até a altura dos olhos, mantendo o filme de tinta ainda úmido em contraste com uma fonte de luz. O local onde ocorre o acúmulo de pontos de maneira uniforme é o valor de

granulometria. Registrou-se este resultado, nas duas escalas. Para aumento da precisão das análises, utilizou-se um grindômetro com escala de 0 a 8H para análise da amostra de dispersão e outro grindômetro com escala de 6 a 8H (Figura 11), para análises dos concentrados moídos.

Todas as amostras tiveram suas análises realizadas em triplicata, e o resultado expresso foi a média destes resultados.

Figura 12 - Vista superior do Grindômetro com escala de 6 a 8 hegman



Fonte: autoria própria.

4.3.2.2 Difração à Laser

O analisador de partículas por difração à Laser que seria disponibilizado por uma empresa parceira, sofreu danos por conta das intensas chuvas que assolaram o Rio Grande do Sul no mês de maio de 2024. O equipamento teve seu sensor danificado e para seu reparo houve a necessidade de importação algumas peças, sendo que até o presente momento o equipamento ainda não está disponível para análise. Por conta disto, este método não será apresentado no trabalho, mas futuramente estas análises serão realizadas e irão complementar este estudo. A

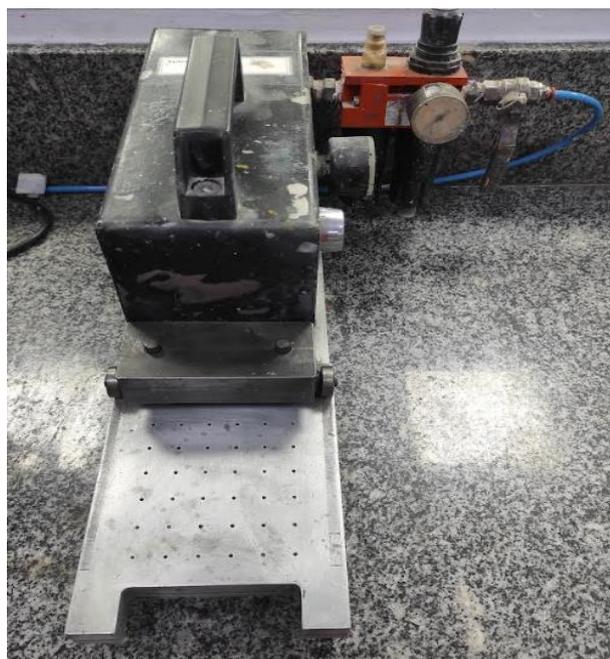
empresa já se disponibilizou a realizar as análises assim que o equipamento estiver disponível, com previsão ainda para 2024.

4.3.3 Força de tingimento

Para avaliação da força de tingimento das amostras, é necessário preparar o que chamamos de corte: uma mistura de uma base contendo dióxido de titânio já disperso (base branca), com as amostras de concentrados laranja preparados. Para isso, em um copo plástico de fundo liso foram pesados analiticamente 10 gramas do concentrado laranja e 90 gramas de base branca. Em seguida, foram homogeneizados por 3 minutos com auxílio de um pincel. As amostras já prontas para análise, ficaram 24 horas em repouso para que o ar incorporado durante a homogeneização fosse eliminado naturalmente da amostra.

Após repetir este processo com todas as amostras, estas foram aplicadas com extensor de 250 micrometros sobre cartelas plastificadas e padronizadas, com auxílio de um aplicador automático (Figura 12) que produz vácuo sob a cartela, evitando variações de camada durante a aplicação com o extensor. Após as aplicadas, as cartelas contendo a película de tinta foram colocadas em estufa a 60°C por 1 hora, para evaporação dos solventes e secagem do filme.

Figura 13 - Aplicador automático com vácuo para extensores



Fonte: autoria própria

Com todas as amostras preparadas, as avaliações de força de tingimento foram realizadas utilizando espectrofotômetro de reflexão da marca X-Rite, modelo Ci 4200 (Figura 13). Para determinar o percentual de força de tingimento, o equipamento compara a amostra lida com um referencial definido, e com base nas leituras das intensidades dos comprimentos de onda refletidos pelo filme de tinta aplicado, o espectrofotômetro indica se a amostra tem a força de tingimento maior, ou menor que o referencial.

Este procedimento é baseado na ASTM D4838, e foi repetido com todas as amostras produzidas. As leituras no espectrofotômetro foram realizadas em triplicata, e o resultado apresentado foi a média das 3 leituras realizadas.

Figura 14 - Espectrofotômetro X-Rite modelo Ci4200



Fonte: autoria própria

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

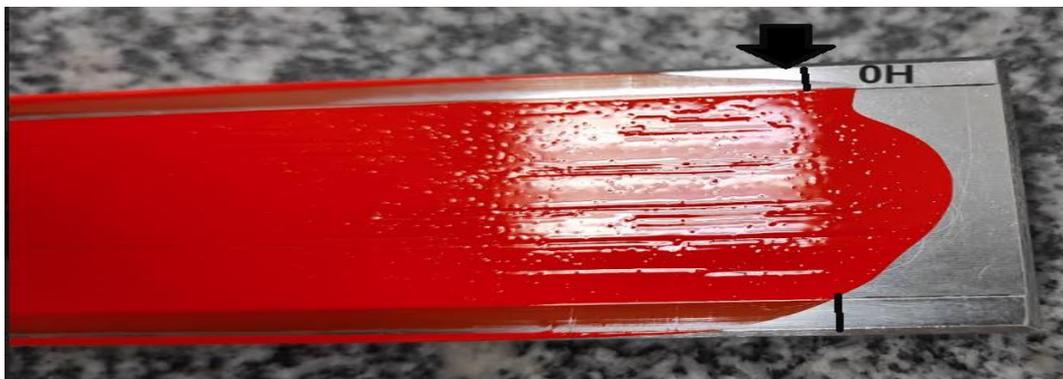
Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes às análises de teor de sólidos, granulometria e força de tingimento, realizadas em todas as amostras de concentrados referentes ao processo de moagem, bem como sua comparação com o processo de dispersão. Todos os experimentos foram realizados em triplicata para aumentar a confiabilidade dos resultados.

5.1 ANÁLISES DE GRANULOMETRIA

Para realizar esta análise, após o processo de moagem as amostras dos concentrados foram armazenadas por 24 horas em bancada, para que o ar incorporado durante o processo de moagem fosse eliminado da amostra. Esta é a principal fonte de erro que ocorre em escala industrial durante as inspeções de processo, pois normalmente não há tempo hábil para aguardar tanto tempo antes de se realizar as avaliações dos produtos.

As avaliações de granulometria foram realizadas utilizando grindômetro com escala de 6 a 8 hegman, equivalentes a uma escala de 25 a 0 μm . Ao atingir grau de dispersão em escala igual ou superior a 7,5 hegman a análise perde precisão, pois este é valor máximo percebido a olho nu. Por conta disto, considerou-se como valor máximo obtido em escala hegman, o valor de 7,5. Para exemplificar como é a visualização dos resultados de granulometria utilizando grindômetro, as Figuras 14 e 15 podem ser observadas.

Figura 15 - Grau de dispersão 0 hegman



Fonte: autoria própria

Figura 16 - Grau de dispersão 7,5 hegman



Fonte: autoria própria

As amostras foram identificadas conforme o tipo de esferas ou combinação de esferas utilizada, bem como o número de passes pelo moinho. A Tabela 3 contém os resultados da análise.

Tabela 3 – Análise granulométrica das amostras

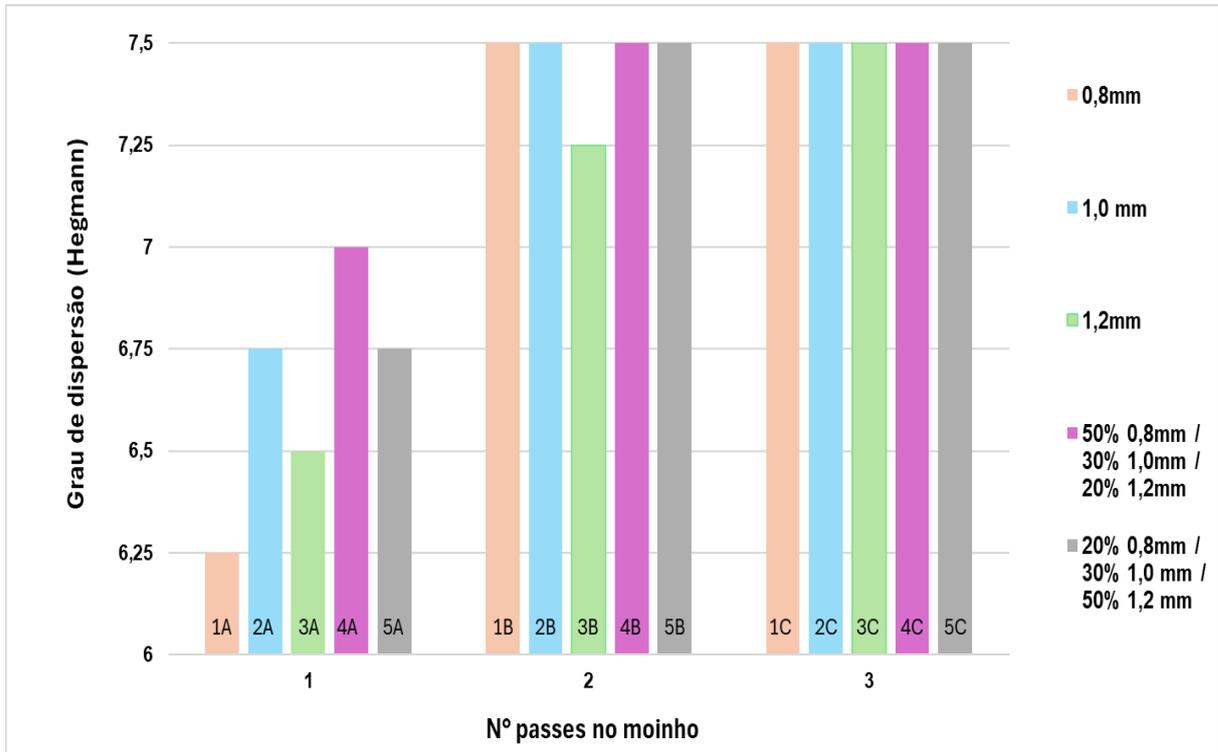
| Experimento | Esferas 0,8 mm | Esferas 1,0 mm | Esferas 1,2 mm | Nº de passes | Granulometria | |
|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|---------------|----------|
| | | | | | hegman | µm |
| Dispersão | - | - | - | 0 | 0 | ≥ 100,00 |
| 1A | 100% | - | - | 1 | 6,25 | 21,88 |
| 2A | - | 100% | - | 1 | 6,75 | 15,63 |
| 3A | - | - | 100% | 1 | 6,50 | 18,75 |
| 4A | 50% | 30% | 20% | 1 | 7,00 | 12,50 |
| 5A | 20% | 30% | 50% | 1 | 6,75 | 15,63 |
| 1B | 100% | - | - | 2 | 7,50 | 6,25 |
| 2B | - | 100% | - | 2 | 7,50 | 6,25 |
| 3B | - | - | 100% | 2 | 7,25 | 9,38 |
| 4B | 50% | 30% | 20% | 2 | 7,50 | 6,25 |
| 5B | 20% | 30% | 50% | 2 | 7,50 | 6,25 |
| 1C | 100% | - | - | 3 | 7,50 | 6,25 |
| 2C | - | 100% | - | 3 | 7,50 | 6,25 |
| 3C | - | - | 100% | 3 | 7,50 | 6,25 |
| 4C | 50% | 30% | 20% | 3 | 7,50 | 6,25 |
| 5C | 20% | 30% | 50% | 3 | 7,50 | 6,25 |

Fonte: autoria própria.

Analisando os resultados de granulometria da Tabela 3, conseguimos facilmente visualizar que conforme o número de passes no moinho aumenta, o grau de dispersão aumenta e o tamanho das partículas diminui, independentemente do tamanho de esfera utilizada. Como o processo de moagem é um processo de desaglomeração física, que evolui conforme acontecem choques entre as esferas e as partículas de pigmento, as justificativas para os comportamentos também se explicam desta forma. Como por exemplo a amostra 1A, que utilizou as esferas de 0,8 mm e teve 6,25 hegman de resultado com 1 passe em comparação com a amostra 2A, que obteve 7,5 hegman utilizando o mesmo tamanho de esfera com 2 passes.

A partir da tabela acima, criou-se o Gráfico 1 para complementar as análises e facilitar a visualização dos comportamentos das amostras. Iniciaremos então as análises avaliando o comportamento das amostras 1, 2 e 3, que utilizam somente um tamanho de esferas. Assim, podemos perceber que ao final do primeiro passe no moinho, as esferas de menor tamanho apresentaram menor eficiência em desaglomerar as grandes partículas de pigmento, quando comparada aos demais tamanhos. Entretanto, ao iniciar o segundo passe, com as partículas de pigmentos menores, a eficiência deste tamanho de esferas aumenta significativamente, pois há uma transferência de energia cinética mais eficiente das esferas para as partículas de pigmento.

Gráfico 1 - Análise de granulometria das amostras



Fonte: autoria própria

A amostra 3, que apresenta o maior tamanho de esfera, teve um desempenho levemente superior à esfera de tamanho menor ao final do primeiro passe, mas no segundo passe teve dificuldade para continuar a manter uma boa eficiência de moagem. Isso pode ser explicado que pelo fato de ser composta apenas por esferas de tamanho maior, a amostra 3 apresenta facilidade na desaglomeração de grandes partículas de pigmentos, demonstrando uma alta eficiência de transferência de energia cinética. Porém, conforme as partículas diminuem de tamanho, a área de contato também diminui e a eficiência de moagem destas esferas segue da mesma maneira. Dentre as amostras que utilizam tamanhos únicos de esferas, a amostra 2 que utiliza tamanhos intermediários parece ter um melhor desempenho que as demais, evidenciando que há grande diferença de eficiência conforme muda-se os tamanhos de esferas.

Já nos tamanhos mistos de esferas, se compararmos as alternativas 4 e 5, fica nítido que a amostra 4, que contém 50% de esferas de 0,8 mm, 30% de esferas de 1,0 mm e 20% de esferas de 1,2 mm, apresenta desempenho não só superior à alternativa 5, mas a todas as outras amostras, demonstrando que há um balanço que proporciona uma ótima sinergia entre os tamanhos de esferas.

5.2 ANÁLISES DE TEOR DE SÓLIDOS

Após realizar o processo de moagem das amostras de concentrados, deve-se realizar as análises do teor de sólidos de cada amostra. Os resultados deste teste presentes na Tabela 4 indicam o quanto de solvente foi perdido durante o processo produtivo.

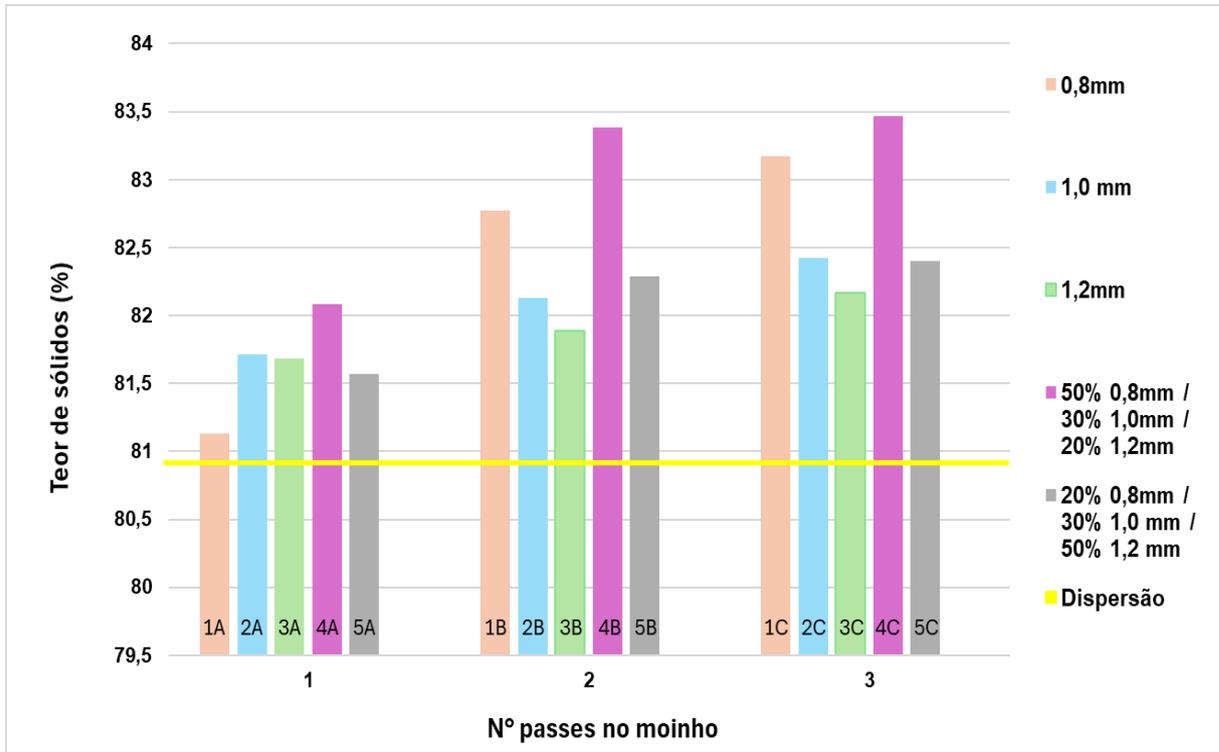
Tabela 4 – Teor de sólidos das amostras após moagem

| Experimento | Esferas 0,8 mm | Esferas 1,0 mm | Esferas 1,2 mm | Nº de passes | Teor de sólidos (%) |
|--------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| Dispersão | - | - | - | 0 | 80,98 |
| 1A | 100% | - | - | 1 | 81,13 |
| 2A | - | 100% | - | 1 | 81,71 |
| 3A | - | - | 100% | 1 | 81,68 |
| 4A | 50% | 30% | 20% | 1 | 82,08 |
| 5A | 20% | 30% | 50% | 1 | 81,57 |
| 1B | 100% | - | - | 2 | 82,77 |
| 2B | - | 100% | - | 2 | 82,13 |
| 3B | - | - | 100% | 2 | 81,89 |
| 4B | 50% | 30% | 20% | 2 | 83,38 |
| 5B | 20% | 30% | 50% | 2 | 82,29 |
| 1C | 100% | - | - | 3 | 83,17 |
| 2C | - | 100% | - | 3 | 82,42 |
| 3C | - | - | 100% | 3 | 82,17 |
| 4C | 50% | 30% | 20% | 3 | 83,47 |
| 5C | 20% | 30% | 50% | 3 | 82,40 |

Fonte: autoria própria.

O Gráfico 2 apresentado abaixo ajuda a melhor visualizar os resultados e entender o comportamento do teor de sólidos conforme as variações dos parâmetros.

Gráfico 2 - Análise do teor de sólidos



Fonte: autoria própria

Inicialmente podemos perceber que independentemente do tamanho de esfera utilizada, perde-se solvente durante o processo de fabricação. As principais causas de perda de solvente se dão por fatores conhecidos como atrito, cisalhamento, aquecimento e volatilidade dos solventes. Estas perdas são difíceis de serem controladas por tratar-se de um processo de fabricação aberto. As análises dos resultados obtidos serão separadas e apresentadas a seguir, para um melhor entendimento do comportamento das etapas de moagem.

5.2.1 Primeiro passe no moinho

Durante o primeiro passe, as partículas de pigmento entram no moinho com tamanhos maiores que 100 μm , percorrem toda a câmara de moagem, e saem pela parte inferior do moinho. Neste processo, a transferência de energia das esferas para as partículas de pigmento é o que promove a separação dos aglomerados de pigmentos. Ao analisarmos os resultados ao final do primeiro passe, nota-se que a amostra 1A, que utilizou as menores esferas, com tamanho de 0,8 mm, obtiveram

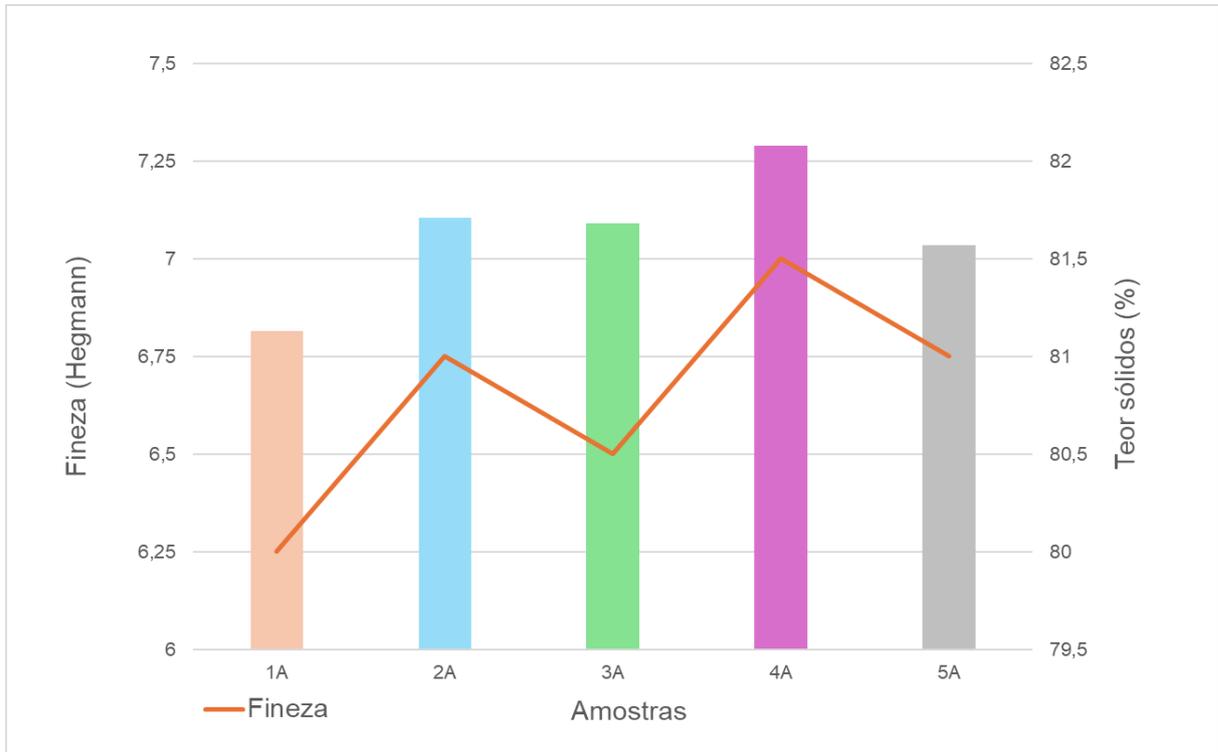
menor aumento no teor de sólidos, ou seja, tiveram menor evaporação de solvente. Já a combinação de diferentes tamanhos de esferas da amostra 4A foi a que obteve maior aumento no teor de sólidos.

Uma justificativa para este comportamento, é que como as esferas da amostra 1A são as menores, e nesta etapa o tamanho das partículas de pigmento são as maiores, estas esferas não têm tanta capacidade de transferir energia cinética pelo processo de cisalhamento, quanto as demais esferas. Este comportamento provoca uma menor geração de calor no meio, resultando numa menor evaporação dos solventes dos concentrados. Se observarmos as análises de granulometria já apresentadas, podemos verificar que dentre as amostras, foi a que obteve menor grau de dispersão dos pigmentos, o que reforça o raciocínio apresentado.

Da mesma maneira, ao observarmos a combinação de esferas da amostra 4A, pode-se observar o mesmo comportamento oposto com o mesmo raciocínio. Neste caso, foi a amostra que apresentou melhor resultado de granulometria, o que sugere uma transferência mais eficiente de energia cinética para as partículas de pigmento, uma maior geração de calor no meio e conseqüentemente uma maior evaporação de solventes.

Ao analisar o Gráfico 3, onde comparamos os resultados de granulometria e teor de sólidos após o primeiro passe do moinho, podemos observar a correlação entre os resultados com o raciocínio proposto, analisando as amostras 1A e 4A. Entretanto, ao analisarmos os valores intermediários de teor de sólidos, a comparação fica mais difícil e complexa. Se considerarmos apenas o raciocínio proposto, podemos verificar que a amostra 3A obteve maior teor de sólidos do que a amostra 5A, logo esperava-se também maior grau de dispersão. Na prática não foi o que ocorreu, mas podemos interpretar este comportamento por outra perspectiva, mantendo o raciocínio anterior. A amostra 3A, é composta 100% por esferas de 1,2 mm, sendo as maiores esferas utilizadas, e que também apresentam a maior carga de transferência de energia cinética para os aglomerados de pigmento.

Gráfico 3 - Resultados de granulometria e teor de sólidos do primeiro passe



Fonte: autoria própria

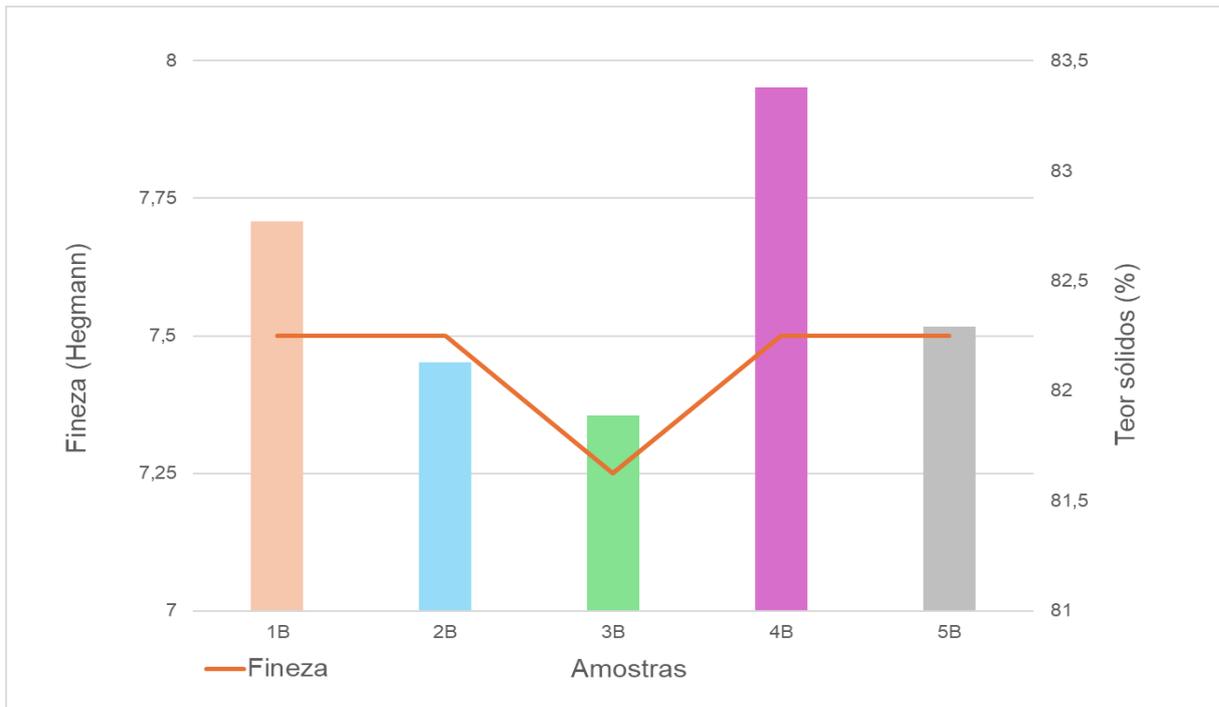
No início da moagem da amostra 3A, as partículas de pigmento também são grandes, o que facilita o encontro dos pigmentos com as esferas e promove alta intensidade de transferência de energia cinética e conseqüentemente gera calor para o meio. Porém, conforme as partículas de pigmento vão diminuindo de tamanho estes encontros entre as esferas e pigmento também diminuem, pois as esferas começam a ter um tamanho proporcionalmente muito maior do que as partículas de pigmento, e reduz drasticamente eficiência de dispersão. Isso justificaria o menor grau de dispersão obtido e uma elevada perda de solvente, causando um aumento maior no teor de sólidos do que a amostra 5A, que possui uma combinação de tamanho de esferas e minimiza este efeito de desbalanço entre tamanho de partícula de pigmento e esfera.

5.2.2 Segundo passe no moinho

A partir do segundo passe no moinho as análises já começam a ficar difíceis sem o auxílio de um granulômetro por difração à laser, pois os resultados obtidos com o grindômetro não são sensíveis o suficiente para distinguir pequenas variações entre

as análises, deixando a interpretação sujeita a erros. Entretanto, o Gráfico 4 permite validar o raciocínio utilizado para explicar o comportamento da amostra 3A frente às demais.

Gráfico 4 - Resultados de granulometria e teor de sólidos do segundo passe



Fonte: autoria própria

Podemos verificar que a amostra 3B apresentou o menor aumento no teor de sólidos quando comparada às demais amostras. Como possui 100% do maior tamanho de esferas utilizado, este resultado parece comprovar que este tamanho apresenta dificuldade em continuar desaglomerando as partículas de pigmento com menor tamanho. Devemos considerar também, que a maior esfera é a que possui menor área superficial e maior volume, o que resulta em um menor número de esfera dentro da câmara de moagem quando comparado às demais. Este fator também é extremamente importante e pode justificar a menor eficiência de granulometria obtida pelas amostras de número 3, que utilizam apenas esferas de 1,2 mm.

Já a amostra 1B, que anteriormente possuía o menor valor de teor de sólidos, agora teve um aumento significativo frente às demais amostras. Por ser composta apenas pelo menor tamanho de esferas, esta amostra agora tem sua eficiência aumentada, pois as partículas de pigmentos estão menores no meio, e a transferência de energia cinética das esferas para os pigmentos é suficiente para aumentar

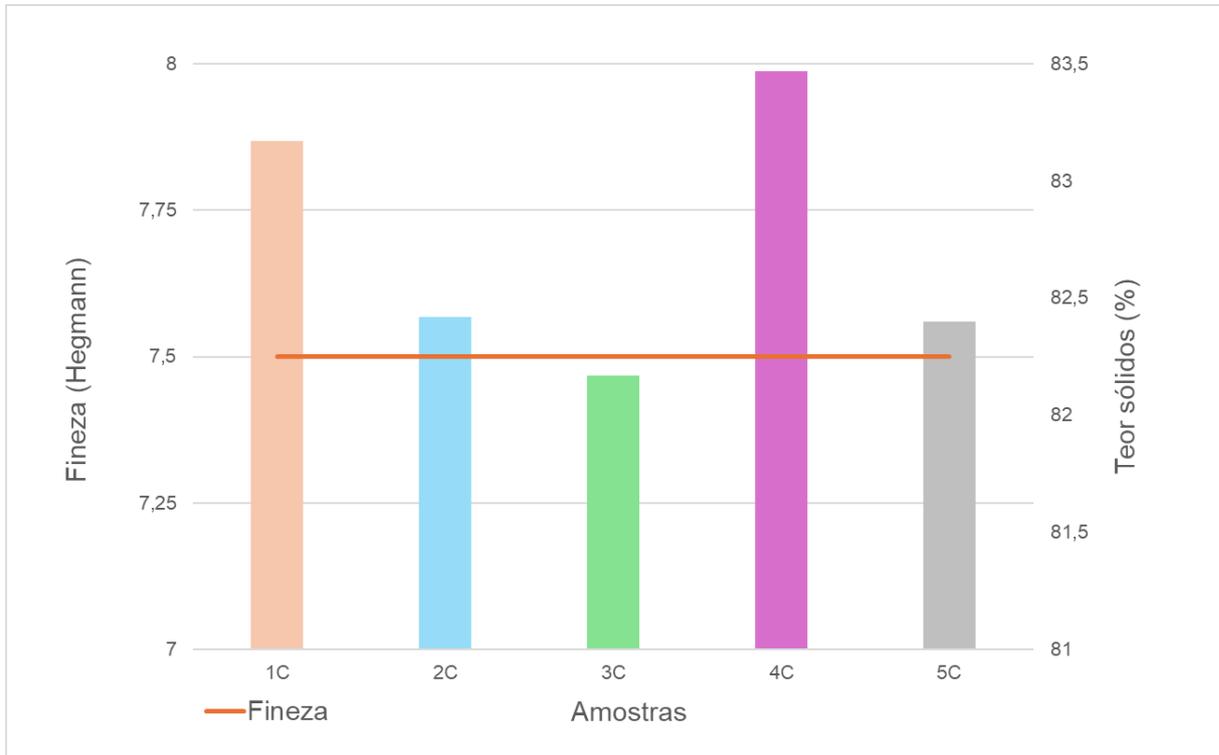
significativamente a eficiência de dispersão, gerando mais calor, e favorecendo o aumento do teor de sólidos pela evaporação dos solventes. Mas, assim como no caso da amostra 3B, a área superficial da esfera faz diferença significativa da moagem. As esferas de 0,8 mm possuem a maior área superficial e menor volume dentre todas as esferas, estando presentes em maior número dentro da câmara de moagem, promovendo maior número de choques entre esfera e pigmento que as demais amostras.

A combinação de esferas da amostra 4, dentre todas as amostras, parece ser a mais eficiente até o momento, pois a amostra 4B continua apresentando o maior valor de teor de sólidos e elevado grau de dispersão. Tudo indica que ocorre uma combinação do melhor desempenho que cada uma possui, mas estes dados devem ser coerentes com os resultados de força de tingimento.

5.2.3 Terceiro passe no moinho

Os resultados do último passe estão apresentados no Gráfico 5. Como podemos ver, o gráfico demonstra que as amostras apresentaram o mesmo perfil de resultado do que com 2 passes, indicando que o comportamento das amostras ainda se manteve o mesmo após ser realizado mais um passe no moinho. Cabe ressaltar, que em condições normais de produção em escala industrial, uma inspeção convencional de grau de dispersão utilizando grindômetro teria liberado a maioria das amostras no segundo passe, pois normalmente se deseja obter 7,5 hegman, que é a máxima escala perceptível a olho nu.

Gráfico 5 - Resultados de granulometria e teor de sólidos do terceiro passe



Fonte: autoria própria

5.2.4 Correção do teor de sólidos

Antes de continuar com o restante das análises, ajustou-se o teor de sólidos de todas as amostras para o valor teórico conhecido de 80,87%. Para esta correção, faz-se o seguinte cálculo:

$$\text{Correção do Teor sólidos: } \left(\frac{TSr}{TSt} - 1 \right) * 100\%$$

Sendo que TSr é o teor de sólidos real da amostra de concentrado e TSt é o teor de sólidos teórico. O resultado é dado em percentual, e refere-se ao percentual de solvente em massa, que deve-se adicionar sobre a massa de amostra para corrigir o teor de sólidos para o valor teórico. Na Tabela 5 estão descritos percentuais de solvente utilizados para correção do teor de sólidos das amostras.

Tabela 5 – Teor de sólidos das amostras após moagem

| Experimento | Teor de sólidos (%) | Correção (%) |
|--------------------|----------------------------|---------------------|
| Dispersão | 81,13 | 0,32% |
| 1A | 81,71 | 1,04% |
| 2A | 81,68 | 1,00% |
| 3A | 82,08 | 1,50% |
| 4A | 81,57 | 0,87% |
| 5A | 82,77 | 2,35% |
| 1B | 82,13 | 1,56% |
| 2B | 81,89 | 1,26% |
| 3B | 83,38 | 3,10% |
| 4B | 82,29 | 1,76% |
| 5B | 83,17 | 2,84% |
| 1C | 82,42 | 1,92% |
| 2C | 82,17 | 1,61% |
| 3C | 83,47 | 3,22% |
| 4C | 82,40 | 1,89% |
| 5C | 81,13 | 0,32% |

Fonte: autoria própria.

5.3 ANÁLISE DE FORÇA DE TINGIMENTO

A análise de força de tingimento foi realizada através aplicação do corte preparado, com extensor de 250 μm em cartela. Após secagem em estufa, as aplicações foram analisadas utilizando espectrofotômetro por reflexão. Para gerar os valores de força de tingimento das amostras, presentes na Tabela 6, foi utilizada a amostra 2B como padrão de referência. A justificativa desta escolha se dá não só por conta de ser o tamanho intermediário das esferas utilizadas, mas também por ser um diâmetro comumente utilizado nas indústrias de tintas. Além disso, se esta amostra estivesse sendo fabricada em escala industrial, a inspeção realizada nesta etapa teria liberado o lote para seguir para o controle de qualidade, finalizando o processo de moagem por atingir o grau de dispersão igual ou superior a 7,5 hegman.

Tabela 6 – Força de tingimento das amostras

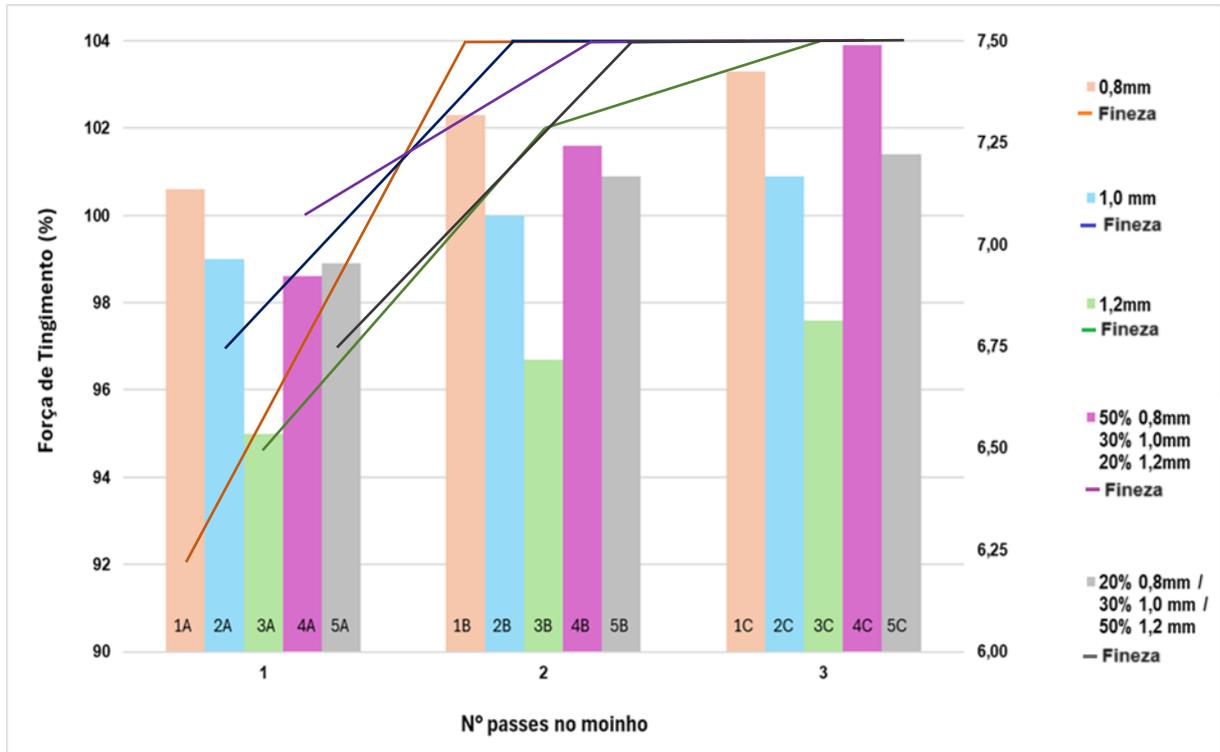
| Experimento | Esferas 0,8 mm | Esferas 1,0 mm | Esferas 1,2 mm | N° de passes | Força de Tingimento (%) |
|--------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| Dispersão | - | - | - | 0 | 91,40 |
| 1A | 100% | - | - | 1 | 100,60 |
| 2A | - | 100% | - | 1 | 99,00 |
| 3A | - | - | 100% | 1 | 95,00 |
| 4A | 50% | 30% | 20% | 1 | 98,60 |
| 5A | 20% | 30% | 50% | 1 | 98,90 |
| 1B | 100% | - | - | 2 | 102,30 |
| 2B (Padrão) | - | 100% | - | 2 | 100,00 |
| 3B | - | - | 100% | 2 | 96,70 |
| 4B | 50% | 30% | 20% | 2 | 101,60 |
| 5B | 20% | 30% | 50% | 2 | 100,90 |
| 1C | 100% | - | - | 3 | 103,30 |
| 2C | - | 100% | - | 3 | 100,90 |
| 3C | - | - | 100% | 3 | 97,60 |
| 4C | 50% | 30% | 20% | 3 | 103,90 |
| 5C | 20% | 30% | 50% | 3 | 101,40 |

Fonte: autoria própria.

Assim como nas análises de granulometria, podemos ver que conforme o número de passes no moinho aumenta, aumenta também a força de tingimento das amostras, independentemente do tamanho de esfera utilizado. A partir do Gráfico 6, podemos verificar a relação direta entre estas propriedades, evidenciando que um menor tamanho de partículas de pigmento no meio aumenta sua força de tingimento.

A redução de tamanho de partícula provoca o aumento na força do tingimento que é explicada pelo aumento da saturação do pigmento laranja no filme de tinta aplicado, ou seja, apesar de todos os concentrados produzidos terem a mesma formulação e teor de pigmento, a quantidade e o tipo de partículas totais que estão presentes no filme de tinta (agregados, aglomerados e partículas primárias) influenciam de maneira significativa nesta propriedade.

Gráfico 6 – Resultados de força de tingimento e granulometria após terceiro passe



Fonte: autoria própria.

Podemos verificar que, com exceção da amostra 1A, todas as amostras tiveram seus resultados conforme o esperado, mantendo o perfil de comportamento que foi observado nas análises de teor de sólidos, o que valida o raciocínio considerado.

Considerando apenas o primeiro passe no moinho, podemos verificar que a amostra 1A não se comportou conforme o esperado, pois apresentou o maior resultado de força de tingimento dentre as amostras, apesar do seu resultado de fineza ser o maior dentre as amostras. Para explicar este comportamento, precisamos levar em consideração que a informação obtida com a análise de granulometria utilizando o grindômetro indica uma região de espessura onde há uma concentração de partículas visíveis a olho nu, e a essa região associa-se os tamanhos das maiores partículas de pigmento do meio. Apesar de ser um equipamento amplamente utilizado, o grindômetro não fornece informações como distribuição e concentração de tamanhos de partícula. Entretanto, mesmo que se obtenha a força de tingimento acima da amostra de referência, a presença de partículas maiores e abaixo do grau estipulado gera riscos de estabilidade ao concentrado. Apenas com o grau de dispersão não é possível correlacionar os resultados de força de tingimento e granulometria da amostra 1A.

Ao analisarmos o segundo passe, podemos ver que a amostra 1B e 4B apresentaram o melhor resultado, mostrando que realmente possuem alta eficiência em desaglomerar os tamanhos intermediários e menores, evidenciados pelo elevado grau de dispersão obtido e alta força de tingimento. Os resultados da amostra 3B evidenciam que realmente um tamanho maior de esfera parece apresentar uma limitação de desempenho quando é necessário desaglomerar partículas menores.

Entretanto, considerando o terceiro passe no moinho, fica evidente que dentre os tamanhos de esferas, utilizando a combinação da amostra 4C, obtêm-se o melhor resultado de força de tingimento. A amostra 1C também apresentou resultados satisfatórios, demonstrando um desempenho levemente inferior que a amostra 4C, mas ambas altamente eficientes. A amostra 3C foi a amostra menos eficiente dentre todos os tamanhos utilizados.

Considerando todos os resultados apresentados, mesmo não analisando individualmente cada amostra, podemos dizer que com exceção das amostras 3, que utiliza apenas esferas de 1,2 mm, todas as outras amostras atingem a força de tingimento e fineza com apenas 2 passes no moinho. A amostra 1 apresentou o melhor desempenho entre as amostras de tamanho único, e a amostra 4 apresentou o melhor desempenho entre as duas combinações avaliadas. Ambas obtiveram elevados desempenhos.

6 IMPACTOS DA ATIVIDADE EXTENSIONISTA

A atividade extensionista foi totalmente desenvolvida no laboratório de pesquisa e desenvolvimento da empresa. Para a execução deste trabalho, cerca de 80 horas foram investidas, sendo elas distribuídas entre pesquisa referente ao tema e desafios existentes, formulação do concentrado que foi utilizado para estudo, prospecção de materiais e parcerias com fornecedores na busca de materiais e equipamentos para realizar a proposta de estudo, plano de elaboração e preparação das amostras seguindo protocolos de teste e cronogramas de execução, análises realizadas em laboratório e análise de dados dos resultados obtidos.

Através deste trabalho, busca-se otimizar o processo de moagem da empresa. Será definido juntamente com o gestor da área produtiva e a gerente do laboratório, a maneira para executar esta avaliação em escala industrial, pois envolve recurso e ocupação das máquinas para validar os resultados obtidos.

7 CONCLUSÕES

Considerando os resultados apresentados, pode-se responder a pergunta de pesquisa *Quais os efeitos do tamanho de esferas utilizadas no processo de moagem de concentrados e da combinação destes tamanhos na eficiência do processo de moagem de um concentrado de pigmento laranja, base solvente, utilizado em tintas industriais?* As análises permitiram concluir que o tamanho de esferas tem influência significativa na eficiência do processo de moagem do concentrado base solvente analisado.

Dentre os tamanhos avaliados, os resultados indicaram que as esferas menores apresentam dificuldades em desaglomerar os pigmentos maiores no início da moagem, mas ao longo do processo têm sua eficiência aumentada significativamente por conta de uma melhor transferência de energia para as partículas menores, refletindo em elevados valores de força de tingimento. As esferas de tamanho intermediário alcançam maior grau de dispersão dos pigmentos inicialmente e atingem bons resultados de força de tingimento, mas não os melhores. Já as esferas maiores possuem um desempenho razoável no início do processo, mas seu desempenho diminui conforme as partículas do pigmento vão diminuindo, resultando em baixa eficiência na moagem e baixos valores de força de tingimento. Com isso foi alcançado o primeiro objetivo específico: *Analisar a eficiência do processo de moagem utilizando 3 diferentes diâmetros de esferas de óxido de zircônio estabilizadas com cério de 0,8 mm, 1,0 mm e 1,2 mm.*

O segundo objetivo específico era *Comparar o desempenho individual das esferas no processo de moagem com a combinação destes diâmetros, através de análises de granulometria e força de tingimento.* As combinações dos tamanhos de esfera mostraram que é possível obter as melhores propriedades de cada tamanhos. A combinação mais eficiente utilizou em sua composição 50% de esferas menores, 30% das intermediárias e 20% das maiores, mostrando que a sinergia entre as esferas proporciona uma transferência de energia mais eficaz ao longo de todo o processo, resultando na melhor capacidade de moagem dentre todas as amostras e maior força de tingimento final, indicando que a proposta inicial do estudo realmente trouxe benefícios e mostra potenciais ganhos para a indústria de tintas, seja na possibilidade de otimização dos processos através do aumento das vazões produtivas, na

diminuição do número de passes ou na possibilidade de minimizar perdas ou maximizar ganhos.

Por fim o terceiro objetivo específico *Verificar a precisão do método convencional de análise de granulometria realizada com o equipamento grindômetro, comumente utilizado nas indústrias de tintas, quando comparado a um analisador de tamanho de partículas por difração à laser (PSA)* para complementar as análises não foi possível de ser realizada até o momento, por indisponibilidade do equipamento. As análises de distribuição e quantificação dos tamanhos de partículas podem ajudar a obter informações mais detalhadas e precisas das amostras, facilitando a correlação entre a granulometria obtida e a força de tingimento. Em breve estas análises serão realizadas e este estudo será complementado com as informações das análises.

O estudo foi realizado com um concentrado utilizando alta carga de pigmento laranja de molibdênio, por ser um pigmento de difícil processamento. A lógica utilizada nesse estudo pode estender-se para todos os processos de moagem das indústrias de tintas, ampliando a aplicação deste estudo, pois a otimização do processo de moagem pode reduzir o tamanho das partículas de pigmento de forma mais eficiente, melhorando a qualidade final dos produtos.

REFERÊNCIAS

ABRAFATI. **O setor de tintas no Brasil**. São Paulo: Associação Brasileira dos Fabricantes de Tintas, 2024.

Anton Paar. Disponível em: www.anton-paar.com. Acesso em: 20 de abril de 2024.

ASTM D1210-05. **Standard Test Method for Fineness of Dispersion of Pigment-Vehicle Systems by Hegman-Type Gage**. American Society for Testing and Materials, 2022.

ASTM D4838–88: **Standard Test Method for Determining the Relative Tinting Strength of Chromatic Paints**. American Society for Testing and Materials, 2016.

BATISTA, M. A. J. **Síntese de poliésteres e caracterização de revestimentos poliéster/melamina após degradação em intemperismo acelerado**. 2004.150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia Química de Lorena, Lorena, São Paulo, Brasil, 2004.

BREITUNG-FAES, S.; KWADE, A. **Prediction of energy effective grinding conditions**. *Minerals Engineering*, v. 43, p. 36-43, 2013.

CENCI, M. O. **Avaliação do desempenho do processo de dispersão com base na formulação de um concentrado de pigmento amarelo de cromo**. 2022. 17f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Química) – Centro Universitário UNISATC. Criciúma, 2022.

DIN ISO 18451-1. **Pigments, dyestuffs and extenders – Terminology – Part 1: General terms (ISO/DIS 18451-1:2014)**

FAZENDA, J. **Tintas: ciência e tecnologia**. 4. ed. São Paulo: Blucher; 2009.

GNECCO, C. **Ensaio para determinação da composição e caracterização de tintas** In: FAZENDA, Jorge M.R. *Tintas, Ciência e Tecnologia*. 4ª edição. São Paulo: Editora Blucher, 2009. cap. 26, p.1009-1037.

GUELI, A. M. **Effect of particle size on pigments colour**. *Color Research & Application*, v. 42, n. 2, p. 236-243, 2017.

GÜNTHERT, P.; HAUSER, P.; RADTKE, V. **Effect of pigment particle size on application properties**. *Review of Progress in Coloration*, v. 19, p. 41-48, 1989.

GUPTA, A.; YAN, D. S. **Mineral processing design and operations: an introduction**. Elsevier, 2016.

HABER, J. B. **Molybdenum: an outline of its chemistry and uses**, ed. E.R. Amsterdam; Oxford: Elsevier, 1994.

HUCKLE, W. G.; LALOR, E. **Inorganic Pigments**. Imperial Paper & Color Corp., Glens Falls, N. Y., 1955.

JHAMB, S. *et al.* **Model-based solvent selection and design framework for organic coating formulations**. Progress in Organic Coatings, v. 140, p. 105471, 2020.

JONES, F.N.; NICHOLS, M.E., PAPPAS, S.P. **Organic Coatings: Science and Technology**. N.J., USA. John Wiley & Sons, 2017.

LAMBOURNE, R.; STRIVENS, Thomas A. **Paint and surface coatings: theory and practice**. Elsevier, 1999.

OYARZÚN, J. M. **Pigment processing: physico-chemical principles**. Vincentz Network GmbH & Co KG, 2015.

PEIXOTO, C. A. L. **Ajuste da cor de tintas no estado líquido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM). Porto Alegre, p.141. 2016.

PSA 1190. **Particle size analyser by laser diffraction** – PSA series. Anton Paar, 2024.

POSTMA, P. R. *et al.* **Energy efficient bead milling of microalgae: Effect of bead size on disintegration and release of proteins and carbohydrates**. Bioresource Technology, v. 224, p. 670-679, 2017.

RMA Tech. Disponível em: <https://rmatech.com.br>. Acesso em: 08 de junho de 2024.

SOUSA, C. S. S. **Produção modular**. 2017. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Biológica) – Universidade do Minho, Braga, 2017.

SUZHOU TONGHUI NEW MATERIALS EQUIPMENT Co. Ltd. **Dispersor industrial tipo plataforma** – Vista lateral. 2024. Disponível em: <http://pt.th-mill.com/disperser/industrial-disperser/industrial-hydraulic-lifting-high-speed.html>. Acesso em 10 de abril de 2024.

TAHARA, T. *et al.* **Low-energy bead-milling dispersions of rod-type titania nanoparticles and their optical properties**. Advanced Powder Technology, v. 25, n. 5, p. 1492-1499, 2014.

YOSHIDA, Wilma C. P.S., OUCHI, J.T., DOS SANTOS, J.F., QUINDICI, M.L.Z. Colorimetria. In: FAZENDA, Jorge M.R. **Tintas, Ciência e Tecnologia**. 4ª edição. São Paulo: Editora Blucher, 2009. cap. 11, p.461; 491.