

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA

Faculdade de Tecnologia de Mauá

Curso Superior de Tecnologia em Polímeros

Giovana Achetta de Oliveira

Kamily Santos Silva

Parâmetros operacionais na secagem de PVC: Influência no processo de secagem
na resina PVC.

Mauá

2026

Giovana Achetta de Oliveira

Kamily Santos Silva

Parâmetros operacionais na secagem de PVC: Influência no processo de secagem
na resina PVC.

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Mauá, como exigência
parcial para obtenção do título de
Tecnólogo em Polímeros sob a orientação
do(a) professor(a) Rondes Ferreira da
Silva Torin.

Mauá

2026

Catálogo-na-Publicação – Biblioteca Fatec Mauá

668.423

O48p Oliveira, Giovana Achetta de.

Parâmetros operacionais na secagem de PVC : influência no processo de secagem na resina PVC / Giovana Achetta de Oliveira ; Kamily Santos Silva. – 2026.

45 p. : il. ; 30 cm.

Orientadora: Profa. Dra. Rondes Ferreira da Silva Torin.

Trabalho de conclusão de curso (Curso Superior de Tecnologia em Polímeros) – Faculdade de Tecnologia de Mauá.

Inclui referências.

1. PVC (policloreto de vinila). 2. Secagem. 3. Leito fluidizado. 4. Transferência de calor e massa. 5. Eficiência energética. I. Silva, Kamily Santos. II. Torin, Rondes Ferreira da Silva. III. Título.

CDD 23.: Termoplásticos 668.423

Elaborada por Tatiana Sambinelli CRB-8 SP-011003/O

Giovana Achetta de Oliveira

Kamily Santos Silva

Parâmetros operacionais na secagem de PVC: Influência no processo de secagem na resina PVC.

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia de Mauá, como exigência parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Polímeros.

Aprovação em: ____/____/____

Banca examinadora ou pareceristas:

Prof.(a) Dra. Rondes Ferreira da Silva Torin
Orientador
FATEC Mauá

Prof.(a) Dr. Anderson Maia
Avaliador
FATEC Mauá

Prof.(a) Afonso Henriques Neto
Avaliador

Algumas pessoas deixam o mundo. Outras deixam marcas tão profundas que se tornam eternas.

Dedicamos este trabalho à memória de Aparecido Ribas e Rosangela Santos (*in memoriam*).

Pai de Giovana e mãe de Kamily, que seguem presentes em nossa caminhada. Que seus nomes permaneçam vivos em nossas lembranças, em nossos corações e em cada conquista que ainda está por vir.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, em primeiro lugar, aos nossos pais, pelo incentivo constante e pelo apoio inestimável durante toda a graduação, sendo nosso maior exemplo de força, amor e dedicação. Mesmo diante das dificuldades, nunca mediram esforços para nos apoiar, incentivar e acreditar em nosso potencial, muitas vezes renunciando aos seus próprios sonhos para que pudéssemos realizar os nossos.

Agradecemos também às pessoas que estiveram ao nosso lado durante esta jornada, oferecendo apoio, compreensão e incentivo em diferentes etapas desta trajetória.

Agradecemos aos professores, que contribuíram de forma essencial para nossa formação acadêmica, compartilhando conhecimento, experiência e inspiração ao longo do curso. Por fim, agradecemos a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O policloreto de vinila (PVC) é um dos polímeros termoplásticos mais produzidos mundialmente, destacando-se por sua ampla aplicação em setores estratégicos e por seu longo ciclo de vida. No processo produtivo, a etapa de secagem da resina obtida por polimerização em suspensão (S-PVC) representa uma operação unitária crítica, devido ao elevado consumo energético e à complexidade dos fenômenos envolvidos, como a transferência simultânea de calor e massa em meios porosos. Este trabalho tem como objetivo analisar a influência dos principais parâmetros operacionais na secagem do PVC em leito fluidizado, com foco na eficiência energética e na qualidade do produto final. Para isso, foi realizada uma revisão da literatura técnica, abordando aspectos relacionados à morfologia da resina, mecanismos de secagem, balanço de energia e variáveis operacionais, como temperatura, vazão de ar, umidade, tempo de residência e granulometria. Os resultados indicam que o controle adequado desses parâmetros é fundamental para evitar problemas como degradação térmica, formação de aglomerados e aumento do consumo energético. Além disso, são discutidas estratégias de otimização do processo, incluindo recuperação de calor, controle da umidade da alimentação e ajuste das condições de fluidização, que podem proporcionar ganhos significativos de eficiência e produtividade. Conclui-se que a integração entre controle operacional e princípios de engenharia de processos é essencial para a melhoria do desempenho da secagem do PVC em escala industrial.

Palavras-chave: PVC; secagem; leito fluidizado; transferência de calor e massa; eficiência energética.

ABSTRACT

Polyvinyl chloride (PVC) is one of the most widely produced thermoplastic polymers worldwide, standing out due to its broad range of applications in strategic sectors and its long service life. In its production process, the drying stage of the resin obtained by suspension polymerization (S-PVC) represents a critical unit operation, due to its high energy consumption and the complexity of the involved phenomena, such as simultaneous heat and mass transfer in porous media. This study aims to analyze the influence of the main operational parameters on PVC drying in a fluidized bed, focusing on energy efficiency and final product quality. For this purpose, a literature review was conducted, addressing aspects related to resin morphology, drying mechanisms, energy balance, and operational variables such as temperature, air flow rate, humidity, residence time, and particle size distribution. The results indicate that proper control of these parameters is essential to avoid issues such as thermal degradation, agglomerate formation, and increased energy consumption. In addition, process optimization strategies are discussed, including heat recovery, feed moisture control, and adjustment of fluidization conditions, which can provide significant gains in efficiency and productivity. It is concluded that the integration of operational control and process engineering principles is essential to improve the performance of PVC drying at an industrial scale.

Keywords: PVC; drying; fluidized bed; heat and mass transfer; energy efficiency.

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CFD	Computational Fluid Dynamics
FATEC	Faculdade de Tecnologia
FG	Vazão de ar (kg/h)
HCl	Ácido Clorídrico
kJ	Quilojoule
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
mW	Vazão de água quente (m³/h)
NBR	Norma Brasileira
PI	Controlador Proporcional-Integral
PVC	Policloreto de Vinila
SEC	Specific Energy Consumption
S-PVC	Policloreto de Vinila (suspensão)
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TG,in	Temperatura do ar de entrada (K)
Tg	Temperatura de transição vítrea
TW,in	Temperatura da água quente de entrada (K)
VCM	Monômero de Cloreto de Vinila
XS,in	Teor de umidade de entrada (kg/kg)
XS,out	Teor de umidade de saída (kg/kg)
μm	Micrômetro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Contextualização do tema.....	10
1.2. Justificativa.....	11
1.3. Objetivo geral.....	11
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1. O polímero PVC.....	12
2.2. Ciclo de Vida e Aspectos Ambientais	14
2.3. Polimerização	15
2.4. Polimerização por suspensão.....	16
2.4.1. Polimerização Por Emulsão.....	18
2.4.2. Polimerização em Massa.....	19
2.5. Centrifugação	21
2.6. Secagem	21
2.6.1. Fundamentos da secagem de sólidos porosos.....	22
2.6.2. Mecanismos de transferência de calor e massa.....	24
2.6.3. Mecanismos de transporte de umidade no interior da partícula.....	24
2.6.4. Sinterização e formação de cenosferas.....	25
2.6.5. Etapas da secagem: período de taxa constante e taxa decrescente	26
2.6.6. Curva característica de secagem	27
3. TIPOS DE SECADORES	28
3.1. Secador pneumático (Flash Dryer)	28
3.2. Secador de leito fluidizado.....	29
3.3. Vantagem dos sistemas multiestágio.....	31
3.4. Aspectos Teóricos	32
4. PARÂMETROS OPERACIONAIS.....	33
4.1 Temperatura	33
4.2 Vazão	34
4.3 Umidade	35
4.4 Tempo de Residência.....	35
4.5 Granulometria	36
4.6 Interação entre os parâmetros operacionais.....	37

5. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS NA QUALIDADE DA RESINA PVC.....	37
5.1 Teor de umidade residual	37
5.2 Formação de aglomerados (fisheyes).....	38
5.3 Degradação térmica	39
5.4 Eficiência energética.....	40
6. PROBLEMAS NA SECAGEM.....	41
6.1. Alto consumo energético	41
6.2. Complexidade técnica	41
7. PROPOSTAS DE MELHORIA DO PROCESSO DE SECAGEM DO PVC	41
7.1. Recuperação de calor do ar de exaustão	41
7.2. Controle da umidade da alimentação	42
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
REFERÊNCIAS	44

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização do tema

O policloreto de vinila, conhecido como PVC, é um dos polímeros termoplásticos mais produzidos mundialmente, ocupando a terceira posição em volume de produção, atrás apenas do polietileno e do polipropileno. Sua ampla gama de aplicações abrange setores estratégicos, consolidando sua relevância econômica e tecnológica no cenário industrial atual. O PVC é caracterizado como um material de aplicações de longo ciclo de vida, ou seja, aplicações nas quais o tempo de vida útil do produto antes de seu descarte para o meio ambiente é bastante longo, podendo ultrapassar 20 anos (BRASKEM, 2015). Essa característica confere ao material uma importância adicional, pois a qualidade obtida durante o processo produtivo impacta diretamente a durabilidade e o desempenho dos produtos finais ao longo de décadas de uso.

Na indústria petroquímica, o PVC é produzido predominantemente pelo processo de polimerização em suspensão (S-PVC), que resulta em uma suspensão aquosa de partículas do polímero com elevado teor de água. Após a polimerização, a água é parcialmente removida por centrifugação, gerando uma "torta" úmida com umidade entre 0,20 e 0,35 kg de água por kg de PVC seco (AUBIN et al., 2014). A etapa subsequente é a secagem, que tem como objetivo reduzir esse teor para valores inferiores a 0,3% em massa (base úmida), conforme especificações industriais de referência, garantindo a qualidade do produto final e sua adequada processabilidade nas etapas de transformação, como extrusão e injeção.

A secagem do PVC constitui, portanto, uma operação unitária crítica, envolvendo fenômenos acoplados de transferência de calor e massa que ocorrem simultaneamente em diferentes escalas. De acordo com Kowalski (2007), a secagem de materiais porosos é um processo complexo, pois depende tanto das propriedades do material quanto das condições operacionais do equipamento. No caso específico do PVC, a morfologia das partículas, caracterizada por uma estrutura hierárquica com macroporos e mesoporos, influencia diretamente a cinética de remoção de água (SZÉKELY et al., 1976).

Além da complexidade técnica, o processo de secagem representa um dos maiores consumos energéticos na produção de PVC. Estudos indicam que esta etapa pode ser responsável por até 30% do custo total de produção do polímero, com consumo específico de energia variando entre 800 e 1500 kJ por kg de PVC seco, dependendo das condições operacionais e do grau do material processado (AUBIN et al., 2014). Este elevado consumo energético está associado não apenas à energia necessária para a evaporação da água, mas também às ineficiências decorrentes do controle inadequado dos parâmetros operacionais. Neste contexto, os principais parâmetros que influenciam o desempenho da secagem incluem a temperatura do ar de entrada, a vazão do ar de secagem, a umidade relativa do ar utilizado, o tempo de residência das partículas no secador e a granulometria da resina. Conforme destacam Levy e Borde (1999), o ajuste adequado desses parâmetros é essencial para garantir a eficiência energética e a qualidade do produto final. O controle inadequado pode resultar em consequências como aumento do consumo energético e degradação térmica do polímero, que pode levar à perda de brancura da resina. A formação de aglomerados (fisheyes), embora associada predominantemente ao processamento posterior em extrusoras (combinação de ação térmica e mecânica), pode ser favorecida por condições inadequadas de secagem que comprometem a estabilidade térmica do material.

Compreender a influência dos parâmetros operacionais no processo de secagem do PVC é fundamental para a indústria, pois permite ajustar o processo de forma mais eficiente, reduzindo custos e garantindo a qualidade do produto.

No entanto, ao buscar materiais de referência sobre o tema, observa-se que existe uma carência de literatura em português que aborde de forma aprofundada a relação entre os parâmetros de secagem e o comportamento da resina PVC. A maioria dos estudos disponíveis está concentrada em periódicos internacionais, como os trabalhos de Baeyens et al. (1995) e Aubin et al. (2014), que avançaram na compreensão da cinética de secagem em escala de partícula e na modelagem de secadores pneumáticos, mas que não estão acessíveis em língua portuguesa.

Diante disso, este trabalho tem como objetivo geral estudar a influência dos principais parâmetros operacionais na secagem da resina PVC, por meio de uma revisão da literatura disponível sobre o tema. Especificamente, busca-se descrever as características da resina que afetam a secagem, explicar os mecanismos de transferência de calor e massa envolvidos, analisar como temperatura, vazão, umidade do ar, tempo de residência e granulometria influenciam o processo e, por fim, discutir os impactos desses parâmetros na qualidade final do produto.

1.2. Justificativa

Falta de literatura em português: Embora existam referências gerais sobre a tecnologia do PVC, detalhes técnicos específicos sobre a otimização de parâmetros de secagem industrial em língua portuguesa são escassos, muitas vezes limitando-se a patentes superficiais ou manuais de fabricantes.

Necessidade de otimização industrial: Pequenos ajustes nos parâmetros operacionais podem gerar ganhos de produtividade de 30% a 45%. A análise técnica detalhada permite identificar gargalos nos sopradores e trocadores de calor, reduzindo custos operacionais e desperdícios energéticos.

1.3. Objetivo geral

Estudar a influência dos parâmetros operacionais na secagem do PVC, analisando como as variáveis de temperatura, vazão, tempo de residência e granulometria impactam a eficiência energética e a capacidade produtiva do sistema industrial.

Avaliar a influência da temperatura e da vazão de ar na capacidade de remoção de umidade e no grau de saturação do ar na saída das zonas úmida e seca.

Analisar o balanço de energia do secador para identificar gargalos térmicos nos trocadores de calor (placas) e aquecedores de ar.

Investigar o impacto da morfologia e granulometria da resina na estabilidade do leito fluidizado e no risco de arraste de partículas finas para os ciclones.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. O polímero PVC

O poli(cloreto de vinila), universalmente conhecido pela sigla PVC (do inglês *Polyvinyl Chloride*), é um polímero termoplástico pertencente à família dos polímeros vinílicos, obtido pela polimerização do monômero cloreto de vinila (VCM) (BRASKEM, 2015). Sua fórmula química é representada por $(C_2H_3Cl)_n$, onde “n” representa o número de unidades monoméricas repetidas ao longo da cadeia polimérica (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Trata-se do terceiro polímero mais produzido no mundo, ficando atrás apenas do polietileno e do polipropileno, o que evidencia sua relevância econômica e tecnológica no cenário industrial global (BRASKEM, 2015).

A cadeia molecular do PVC é composta por átomos de carbono, hidrogênio e cloro, sendo que aproximadamente 57% de sua massa é constituída por cloro e os 43% restantes por eteno (derivado do petróleo) (SOARES, 2020). Esta alta concentração de cloro, proveniente do sal comum (NaCl) obtido por eletrólise da salmoura, confere ao polímero características singulares que o distinguem de outros termoplásticos. O cloro na estrutura molecular aumenta as interações intermoleculares entre as cadeias devido à alta eletronegatividade deste elemento, resultando em fortes interações dipolo-dipolo entre os átomos de cloro de uma cadeia e os átomos de hidrogênio da cadeia vizinha (SOARES, 2020).

Em sua forma pura, recém-produzida e sem aditivos, o PVC apresenta-se como um pó branco, rígido e quebradiço à temperatura ambiente (BRASKEM, 2015; SOARES, 2020). Esta rigidez natural decorre do fato de o PVC ser um polímero predominantemente amorfo, com domínios de microcristalinidade provenientes de curtas sequências sindiotáticas na cadeia. Sua Temperatura de Transição Vítrea (T_g) situa-se em torno de 80 °C a 82 °C (SOARES, 2020, 2025), o que significa que abaixo desta temperatura o material comporta-se como um sólido vítreo e rígido, enquanto acima dela adquire maior mobilidade molecular, tornando-se mais flexível e processável.

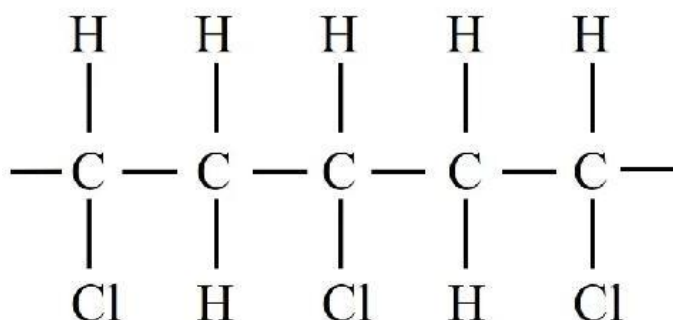
Devido à sua polaridade molecular, o PVC forma interações favoráveis com plastificantes, estabilizantes, lubrificantes, modificadores de impacto e cargas. Os plastificantes, por exemplo, são moléculas que se intercalam entre as cadeias poliméricas, afastando-as e reduzindo as forças intermoleculares dipolo-dipolo, o que confere flexibilidade ao material mesmo à temperatura ambiente (BRASKEM, 2015). Esta capacidade de “formulação” permite que o PVC seja transformado em produtos com propriedades que vão desde total rigidez (como tubulações para saneamento) até elevada flexibilidade (como mangueiras, isolamento de cabos e dispositivos médicos) (SOARES, 2020; BRASKEM, 2015).

A presença do cloro na estrutura molecular também confere ao PVC uma resistência à propagação de chamas (autoextinguibilidade). Quando exposto ao fogo, o PVC libera ácido clorídrico (HCl) gasoso, que atua como um inibidor da combustão na fase gasosa. No entanto, esta mesma reação de liberação de HCl torna o polímero termossensível, requerendo o uso de estabilizantes térmicos durante o processamento para evitar a descoloração e a degradação das propriedades mecânicas (BRASKEM, 2015). A degradação térmica do PVC inicia-se a partir de aproximadamente 100 °C, sendo acelerada em temperaturas superiores a 130-140 °C (AUBIN et al., 2014; SOARES, 2020). Do ponto de vista da massa molar, o PVC apresenta valores que variam tipicamente entre 40.000 e 250.000 g/mol, dependendo das condições de polimerização e do grau da resina, frequentemente expresso pelo valor K, que representa uma medida indireta do tamanho das cadeias poliméricas do

PVC, que em aplicações comerciais situa-se entre 55 e 80 (PVC RESIN CHARACTERIZATIONS, 2021).

A distribuição de massa molar influencia diretamente a processabilidade e as propriedades mecânicas do produto final, sendo controlada durante a etapa de polimerização. Além do processo de polimerização em suspensão (S-PVC), que responde por aproximadamente 80% da produção mundial, o PVC também pode ser produzido pelos processos de emulsão (E-PVC) e massa (massa-PVC), cada qual conferindo características específicas de granulometria, pureza e porosidade à resina (BRASKEM, 2015). O PVC obtido por polimerização em suspensão é o mais utilizado para aplicações rígidas e semi-rígidas, como tubos, conexões e perfis, enquanto o PVC de emulsão é mais adequado para pastas e revestimentos.

Figura 1 - Fórmula molecular do Policloreto de Vinila



Fonte: RESEARCHGATE. The molecular formula of polyvinyl chloride, 2018.

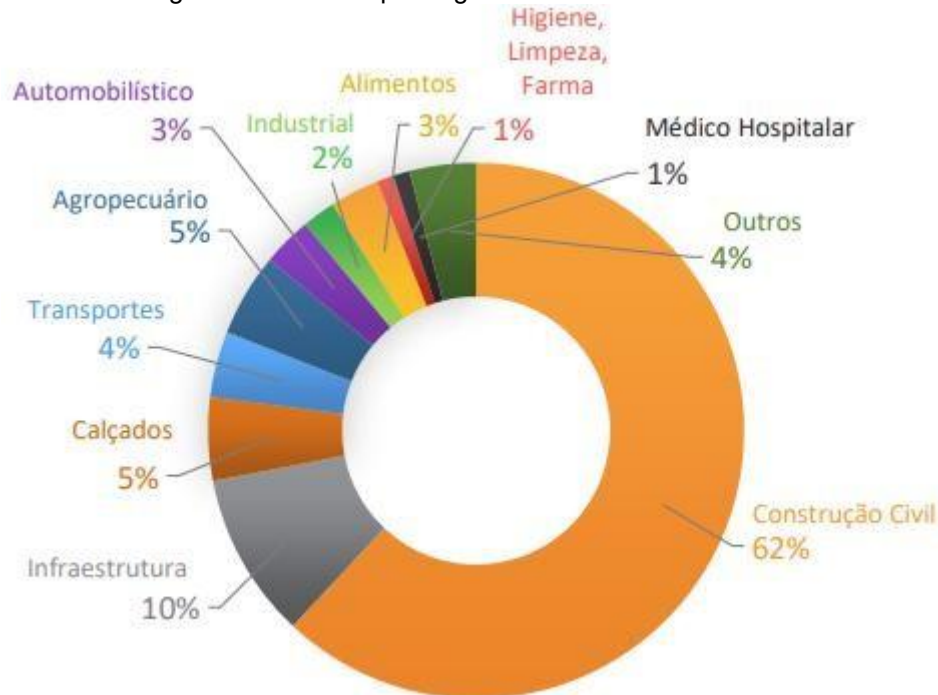
A versatilidade do PVC se reflete na sua presença em setores estratégicos da economia. A maioria dos estudos e manuais técnicos consultados aponta a Construção Civil como seu principal mercado de consumo. Os materiais de PVC são comumente utilizados para tubulações, edifícios, sistemas de drenagem, peças automotivas, mangueiras, isolamento de cabos e dispositivos médicos (Yang et al., 2024). Dados consolidados pela indústria indicam que, no Brasil, as aplicações diretamente ligadas à construção civil, como tubos, conexões, perfis, fios e cabos, somaram aproximadamente 62% da demanda total de PVC (NUNES, 2006, p. 12). Esta preferência se deve a vantagens como a durabilidade, facilidade de instalação e resistência a elementos ambientais (6Wresearch, 2025). A presença do átomo de cloro em sua estrutura molecular torna o PVC um polímero naturalmente resistente à propagação de chamas, contribuindo para aplicações nas quais este item é desejado, tais como fios e cabos elétricos, eletrodutos, forros e revestimentos residenciais (ZAIONCZ, 2006, p. 9).

Além da construção civil, o PVC desempenha um papel crucial em outros segmentos da economia. Uma revisão sobre a química do PVC destaca seu uso na indústria de embalagens, desde filmes esticáveis para alimentos até frascos soprados e, crucialmente, em aplicações médico-hospitalares como bolsas de sangue e cateteres (EDO et al., 2024, p. 12; NUNES, 2006, p. 12). No segmento de calçados, o PVC surge como excelente opção para a confecção de solados e outros componentes (ZAIONCZ, 2006, p. 8). Nos segmentos de laminados e espalmados, a versatilidade do PVC permite tanto a confecção de couro sintético quanto de lonas para as mais diversas aplicações (ZAIONCZ, 2006, p. 8).

A polimerização em suspensão é a tecnologia dominante para a produção de PVC, representando cerca de 80% da produção mundial do polímero (BRASKEM, 2015).

Os processos de polimerização em emulsão e micro-suspensão respondem por cerca de 10 a 15% do consumo mundial, enquanto os processos em massa e solução possuem menor representatividade industrial (NUNES, 2006, p. 34; ZAIONCZ, 2006, p. 3).

Figura 2: Demanda por segmento de mercado no Brasil



Fonte: Instituto Brasileiro de PVC, 2025.

2.2. Ciclo de Vida e Aspectos Ambientais

Uma característica frequentemente apontada na literatura como um atributo do PVC é seu longo ciclo de vida. Materiais educativos da indústria classificam os produtos de PVC de acordo com sua durabilidade: aplicações de ciclo muito longo, como tubos, conexões e perfis, possuem tempo de vida útil superior a 20 anos, podendo ultrapassar 50 anos em muitas aplicações (NUNES, 2006, p. 15). A expectativa de vida dos tubos de PVC é geralmente definida como sua resistência de 50 anos sob pressão interna, determinada por meio de linhas de regressão a partir de testes de ruptura de longo prazo (Rollepaal, 2025). Esta longevidade contribui para a conservação de recursos, pois reduz a necessidade de substituição frequente e o consumo de matéria-prima ao longo do tempo. Sob a ótica do ciclo de vida, o material destaca-se pela sua durabilidade extrema, embora apresente desafios ambientais devido à sua resistência à degradação natural (EDO et al., 2024, p. 4).

Entretanto, o ciclo de vida do PVC apresenta desafios ambientais significativos. A produção de PVC tem maior consumo de energia e maiores emissões de gases de efeito estufa (2,82–5,47 kg CO₂/kg PVC) em comparação com outros plásticos (Yang et al., 2024). Além disso, a presença de cloro na estrutura do PVC torna os resíduos de PVC o polímero mais perigoso nos resíduos plásticos devido às emissões de plastificantes ftalatos e organoclorados (por exemplo, dioxinas, furanos) durante o descarte inadequado (Yang et al., 2024). Os métodos tradicionais de descarte, como aterros e incineração, são desafiadores devido aos riscos ambientais, incluindo a

liberação de gases tóxicos e cloreto de hidrogênio (HCl) (Yang et al., 2024). No entanto, o átomo de cloro atua como um marcador que permite a separação automatizada do PVC de outros plásticos no lixo urbano, facilitando sua reciclagem (NUNES, 2006, p. 14).

Ao final de sua vida útil, o PVC não precisa ser necessariamente descartado em aterros sanitários, pois existem rotas estabelecidas para sua reciclagem. O processo de reciclagem de produtos de PVC pode ocorrer em três formas distintas: reciclagem mecânica (combinação de processos operacionais para aproveitamento do material descartado), reciclagem química (conversão do resíduo em matérias-primas petroquímicas básicas) e reciclagem energética (compactação dos resíduos e subsequente incineração para conversão da energia química em energia calorífica ou eletricidade) (NUNES, 2006, p. 287, 289). Avanços recentes incluem uma descoberta inovadora de reciclagem química que converte resíduos mistos de PVC e poliolefinas em hidrocarbonetos na faixa da gasolina e ácido clorídrico à temperatura e pressão ambientes, usando catálise por líquido iônico (Rangwala, 2026; Zhang et al., 2025). Esses fatores tornam o PVC um material com potencial de alinhamento aos princípios da economia circular, embora desafios relacionados à emissão de substâncias perigosas em processos de combustão inadequados ainda necessitem de atenção (EDO et al., 2024, p. 4).

2.3. Polimerização

A literatura técnica e científica demonstra que a compreensão do processo de polimerização do poli(cloreto de vinila) (PVC) é fundamental para explicar as propriedades finais do material, uma vez que a morfologia da partícula definida durante esta etapa influencia diretamente sua processabilidade e desempenho em aplicações finais (ZAIONCZ, 2006, p. 4). Quimicamente, o PVC é sintetizado exclusivamente por meio de um mecanismo de polimerização em cadeia via radicais livres, um processo que se estrutura em três estágios cinéticos fundamentais: iniciação, propagação e terminação (NUNES, 2006, p. 31-33). Este mecanismo é desencadeado pela decomposição térmica de um iniciador, tipicamente um peróxido orgânico como o peróxido de benzoíla ou peroxicarbonatos, que, sob efeito de aquecimento, gera radicais livres altamente reativos. Estas espécies químicas atacam a dupla ligação carbono-carbono do monômero cloreto de vinila (MVC), abrindo-a e iniciando o crescimento da cadeia polimérica (NUNES, 2006, p. 32). A etapa de terminação, que pode ocorrer por desproporcionamento (formando duas macromoléculas) ou por combinação (formando uma única macromolécula), é particularmente relevante para o PVC, pois o predomínio do mecanismo de desproporcionamento confere às resinas comerciais uma distribuição de pesos moleculares característica, com índice de polidispersividade (M_w/M_n) tipicamente em torno de 2,0 (NUNES, 2006, p. 58).

Quatro técnicas principais de polimerização são empregadas para sua obtenção – suspensão, emulsão, micro-suspensão e massa – cada uma conferindo características morfológicas e propriedades específicas à resina, sendo a polimerização em suspensão responsável por cerca de 80% de todo o PVC consumido mundialmente (NUNES, 2006, p. 34; ZAIONCZ, 2006, p. 3).

2.4. Polimerização por suspensão

No processo de polimerização em suspensão, o monômero cloreto de vinila (MVC) na forma líquida é disperso em água na forma de pequenas gotas, com diâmetro típico entre 30 e 150 μm , através da aplicação de agitação vigorosa (ZAIONCZ, 2006, p. 3). Para evitar que estas gotas se coalesçam e ocorra a separação de fases, adiciona-se à mistura um agente de suspensão (também denominado dispersante ou colóide protetor), tipicamente um polímero orgânico solúvel em água, como o poli(álcool vinílico) (PVAL) ou derivados de celulose (hidroxietilcelulose, metilcelulose, hidroxipropil metil celulose) (NUNES, 2006, p. 37). O sistema dispersante moderno é composto por uma combinação de agentes primários e secundários. Os dispersantes primários, como os PVALs com grau de hidrólise entre 70 e 90 mol% e viscosidade em solução aquosa a 4% na faixa de 5 a 60 cP, são responsáveis por definir o tamanho médio das partículas e a estabilidade global da suspensão. Já os dispersantes secundários, que podem ser PVALs de baixíssimo grau de hidrólise (praticamente insolúveis em água) ou surfactantes iônicos como o lauril sulfato de sódio, o dioctil sulfossuccinato de sódio e ésteres de sorbitan, têm a função crítica de controlar a porosidade interna das partículas, evitando a interpenetração das partículas primárias e aumentando a capacidade de absorção de plastificantes da resina final (NUNES, 2006, p. 38).

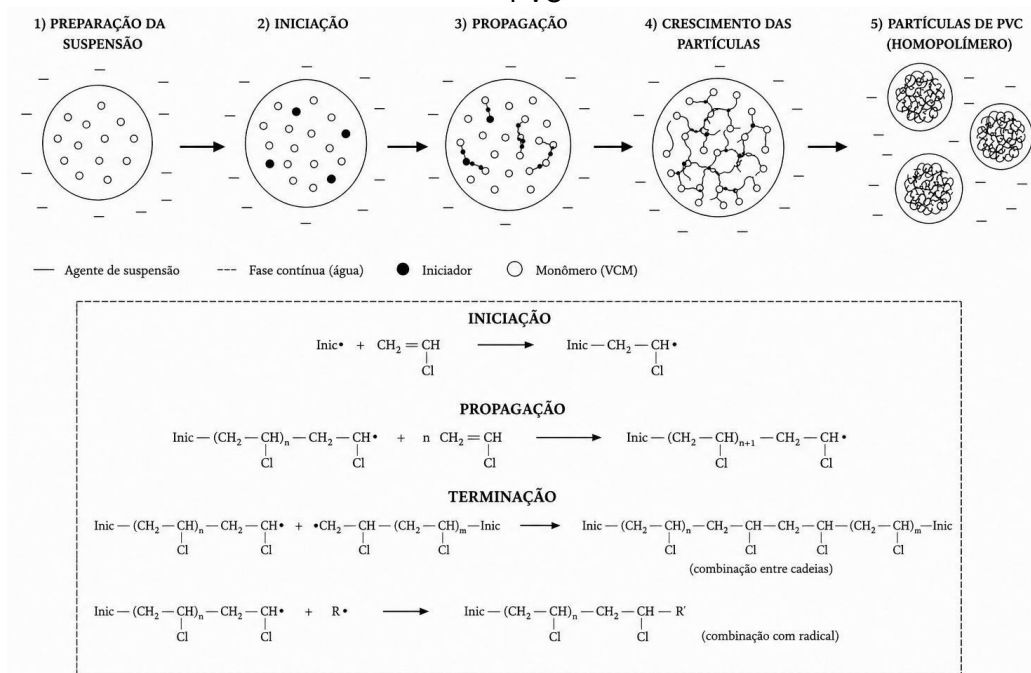
Os iniciadores utilizados na polimerização em suspensão devem ser solúveis no monômero, pois a reação de polimerização ocorre preferencialmente no interior das gotas de MVC dispersas. A escolha do sistema iniciador é criteriosa e envolve, frequentemente, a combinação de diferentes peróxidos orgânicos, como o 1,1,3,3-tetrametilbutil peróxineodecanoato e o di(2-etilhexil) peroxidicarbonato, em proporções que otimizem a taxa de decomposição e a geração de radicais livres ao longo da batelada (NUNES, 2006, p. 34). A reação é conduzida em reatores de batelada (batch), cuja escala tem aumentado exponencialmente ao longo das décadas para maximizar a produtividade. Enquanto as plantas originais da década de 1940 operavam com reatores de aproximadamente 5 m^3 , as plantas modernas alcançam rotineiramente volumes superiores a 50 m^3 , com capacidade de produzir cerca de 25 toneladas de resina seca por batelada. Projetos de ponta já operam com reatores de até 200 m^3 , empregados pelas principais empresas produtoras globais (NUNES, 2006, p. 34). O procedimento de operação inicia-se com o carregamento de água desmineralizada, soluções aquosas dos dispersantes e os iniciadores (na forma de emulsões aquosas ou em solventes orgânicos). O reator é então selado e submetido a alto vácuo para eliminar traços de oxigênio, cuja presença tem efeitos adversos na reação, aumentando o tempo de polimerização e comprometendo as propriedades do produto final, como a estabilidade térmica e as propriedades dielétricas (NUNES, 2006, p. 34, 39). Após este procedimento, o MVC líquido é introduzido sob pressão através de uma válvula de agulha, a agitação é iniciada (tipicamente a 600 rpm) e a camisa do reator é aquecida com vapor para elevar a temperatura até a faixa de polimerização (NUNES, 2006, p. 34).

Um dos aspectos mais críticos e limitantes da polimerização do PVC é a sua natureza extremamente exotérmica. A energia liberada durante a reação de polimerização é significativa, e a capacidade de remoção de calor do meio reacional é geralmente o fator que define o tempo de ciclo da batelada e, conseqüentemente, a produtividade da planta.

Com o aumento do volume dos reatores, este desafio se agrava devido à redução da relação superfície/volume, que diminui a eficiência da troca térmica exclusivamente através da camisa de resfriamento do reator. Tentativas de aumentar a capacidade de troca térmica por meio da utilização de serpentinas internas geralmente não são viáveis, devido à dificuldade de limpeza e à possibilidade de incrustação, que tem efeitos adversos no produto final (NUNES, 2006, p. 34). Para superar esta limitação fundamental, as plantas industriais modernas empregam estratégias avançadas de engenharia térmica. O uso de água gelada na camisa do reator é uma prática comum, mas a tecnologia mais eficaz envolve a utilização de condensadores de refluxo. Estes dispositivos, instalados no topo do reator, permitem o resfriamento contínuo ao aproveitar o calor latente de vaporização do próprio monômero cloreto de vinila. O MVC na fase gasosa é removido do topo do reator, liquefeito em um trocador de calor externo e, em seguida, retornado ao sistema como líquido. Este ciclo de vaporização-condensação remove grandes quantidades de calor de forma muito mais eficiente do que a simples troca térmica pelas paredes do reator, permitindo maior controle da temperatura e redução dos tempos de batelada (NUNES, 2006, p. 34)

Em conjunto com o sistema dispersante, a agitação é responsável pela estabilidade da suspensão formada e pelo controle do tamanho de partícula da resina obtida, podendo também influenciar significativamente a porosidade e a densidade aparente do produto (NUNES, 2006, p. 38). A estabilidade das gotas de monômero em meio à fase aquosa depende de três fenômenos principais influenciados pela agitação: a coalescência (tendência das gotas se aglomerarem), a fragmentação (tendência das gotas grandes se dividirem em menores) e a estabilidade da gota (velocidades muito baixas podem ser insuficientes para manter a suspensão, devido à diferença de densidade entre o monômero e a água). Existe um diâmetro mínimo de gota para cada nível de velocidade de agitação, acima do qual a estabilização do sistema se torna possível (NUNES, 2006, p. 38-39).

Figura 3: Esquema da polimerização por suspensão do Cloreto de Vinila (VCM) para formação do PVC



(Fonte: Autores)

2.4.1. Polimerização Por Emulsão

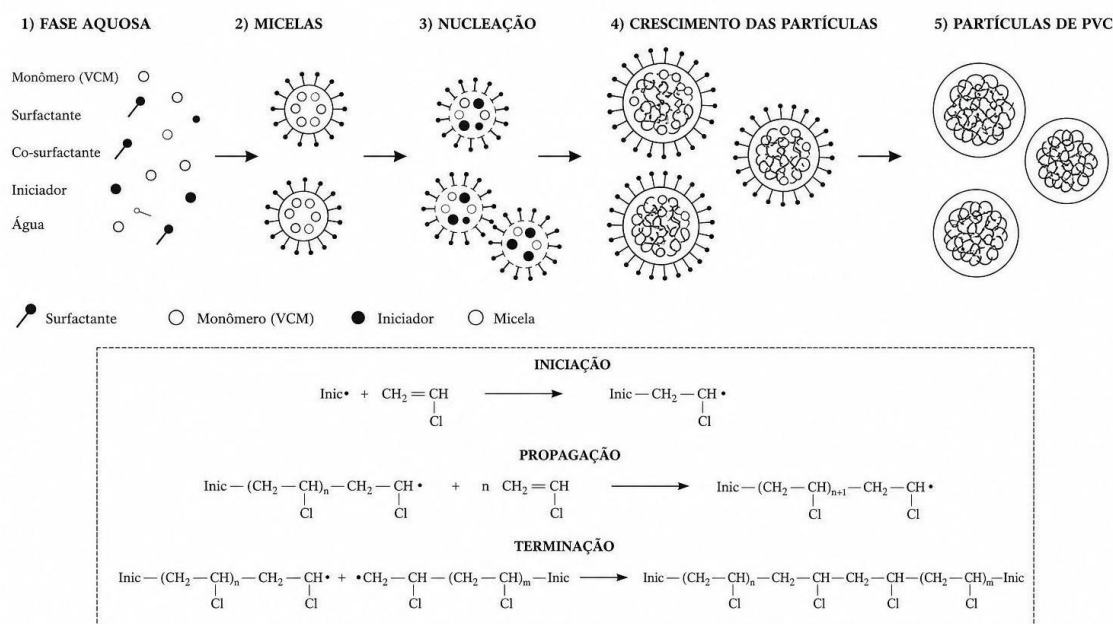
Embora a polimerização em suspensão seja dominante, os processos de emulsão e micro-suspensão são igualmente importantes para aplicações específicas, sendo responsáveis por cerca de 10 a 15% do consumo mundial de PVC (ZAIONCZ, 2006, p. 3). No processo de polimerização em emulsão, o MVC líquido é disperso na forma de gotas extremamente pequenas, com diâmetro tipicamente entre 0,1 e 1 μm , em uma fase aquosa contínua contendo um agente emulsificante (como sais de sódio e amônio de álcoois sulfatados, sulfonatos de alquila, sulfosuccinatos e ácidos graxos, tipicamente na proporção de 1 a 3% em peso de monômero) e um iniciador solúvel em água (como persulfato de potássio ou de amônio) (NUNES, 2006, p. 39-40).

A reação de polimerização ocorre preferencialmente no interior das micelas formadas pelo emulsificante, e não diretamente nas gotas de monômero. A temperatura de polimerização, geralmente na faixa de 40 a 60°C, é mantida por sistemas de encamisamento, e o controle do pH é crítico para a estabilidade do látex, sendo comumente utilizados sistemas tampão como carbonato de sódio ou bicarbonato de sódio (NUNES, 2006, p. 40). O produto resultante é um látex, uma dispersão coloidal estável de partículas poliméricas ultrafinas em água, com tamanho médio de partícula da ordem de 0,1 a 0,25 μm , que pode ser utilizado diretamente em aplicações como revestimentos de tecidos e papéis, ou seco para produzir resinas em pó para plastissóis (NUNES, 2006, p. 55; ZAIONCZ, 2006, p. 3).

O processo de polimerização em micro-suspensão é uma variação na qual o iniciador utilizado é solúvel no monômero (e não na água) e todo o monômero é pré-emulsificado na forma de pequenas gotículas (0,1 a 3 μm) por meio de homogeneização mecânica sob altas taxas de cisalhamento, antes de ser transferido para o reator de polimerização (NUNES, 2006, p. 41). Esta técnica permite um controle mais preciso da distribuição do tamanho de partícula do látex final. A técnica de "semeadura" (ou seeding), na qual partículas de látex pré-polimerizadas são introduzidas no reator para atuar como núcleos de crescimento, é frequentemente empregada para ajustar as características reológicas e o tamanho das partículas da resina (NUNES, 2006, p. 41).

A quantidade de MVC convertido em PVC por batelada na polimerização em emulsão e micro-suspensão encontra-se normalmente entre 85 e 95%, sendo que até aproximadamente 70% de conversão a pressão no reator é constante, começando a diminuir quando todo o monômero líquido é consumido, momento em que o monômero gasoso é usualmente recuperado (NUNES, 2006, p. 40).

Figura 4: Esquema da polimerização por emulsão do Cloreto de Vinila (VCM) para formação do PVC



(Fonte: Autores)

2.4.2. Polimerização em Massa

Finalmente, o processo de polimerização em massa, embora atualmente em desuso comercial devido às suas dificuldades operacionais, merece menção por produzir resinas de altíssima pureza. Neste processo, o MVC é polimerizado na ausência de qualquer solvente ou água, utilizando-se um iniciador solúvel no monômero, tipicamente 0,8% de peróxido de benzoíla (NUNES, 2006, p. 42-43). A remoção do calor é extremamente desafiadora, pois o PVC formado é insolúvel em seu próprio monômero, tornando o meio reacional heterogêneo e altamente viscoso desde os estágios iniciais da reação. O processo de um estágio, conduzido em cilindros rotativos contendo bolas de aço para facilitar a remoção de calor, operava por aproximadamente 17 horas a 58°C. A polimerização em dois estágios (primeiro até 15% de conversão, depois até 85%) foi desenvolvida para oferecer maior controle sobre o tamanho de partícula (controlado no primeiro estágio) e o peso molecular (controlado no segundo estágio) (NUNES, 2006, p. 43). Apesar das dificuldades de controle, as resinas obtidas por este método são caracterizadas pelo alto grau de pureza, excelente transparência e estabilidade térmica, devido à ausência total de resíduos de dispersantes, emulsificantes ou solventes (NUNES, 2006, p. 43).

Um ponto crucial, extensivamente abordado na literatura especializada, é a relação direta entre as condições de polimerização e a morfologia da partícula de PVC. O termo morfologia refere-se à organização hierárquica de todas as estruturas físicas da partícula, desde a escala macroscópica do grão até a escala nanométrica dos domínios cristalinos, sendo esta morfologia definida durante a polimerização e influenciando fortemente a processabilidade e as propriedades físicas do produto final (ZAIONCZ, 2006, p. 4). No processo de suspensão, a partícula final (grão de 50 a 200 µm) não é uma entidade sólida homogênea. Análises detalhadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) revelam que seu interior é composto por aglomerados de partículas muito menores, denominadas partículas primárias, com diâmetro típico de cerca de 1 µm (ZAIONCZ, 2006, p. 4).

Estas partículas primárias são formadas por precipitação do polímero a partir do monômero, devido à sua insolubilidade, logo nos estágios iniciais da polimerização (a partir de aproximadamente 2% de conversão) (NUNES, 2006, p. 49). Esta característica de insolubilidade do polímero no monômero é rara no universo dos polímeros conhecidos, sendo essa a responsável por conferir ao PVC algumas de suas características únicas (NUNES, 2006, p. 49). À medida que a reação progride, estas partículas primárias se aglomeram, formando estruturas maiores denominadas aglomeradas de partículas primárias, com diâmetro entre 3 e 10 μm (NUNES, 2006, p. 50). Durante o processo de polimerização em suspensão, o colóide protetor (PVAL) forma uma fina membrana pericelular com espessura na faixa de 0,01 a 0,02 μm em torno de cada gota de monômero. Estudos de Davidson e Witenhafer, citados por NUNES (2006, p. 49), demonstraram que esta membrana é, na verdade, formada por um copolímero enxertado de cloreto de vinila no PVAL. Nos estágios iniciais do processo, partículas de PVC são depositadas sobre esta membrana tanto a partir do lado da fase aquosa quanto do lado do monômero, formando uma membrana de espessura da ordem de 0,5 a 5 μm (NUNES, 2006, p. 49). O volume vazio existente entre estas partículas primárias é o que confere a porosidade característica às resinas de PVC obtidas por suspensão. Esta porosidade é uma característica vital, pois é através dela que os aditivos líquidos (especialmente plastificantes) penetram e são absorvidos pelas partículas durante o processo de mistura a quente (dry blend), permitindo a criação de compostos de PVC flexível. Resinas destinadas a aplicações flexíveis, que exigem alta absorção de plastificantes, são produzidas com alta porosidade, enquanto resinas para aplicações rígidas, que são processadas diretamente a partir do pó, possuem menor porosidade e maior densidade aparente (NUNES, 2006, p. 36, 62-63). Além da porosidade, o PVC apresenta um baixo grau de cristalinidade, tipicamente da ordem de 8 a 10% para polímeros comerciais. Esta propriedade é diretamente influenciada pela temperatura de polimerização. Polímeros obtidos a 5°C apresentam cristalinidade de cerca de 15%, enquanto a polimerização a -75°C produz um polímero com aproximadamente 30% de cristalinidade (ZAIONCZ, 2006, p. 5). Esta estrutura semicristalina é formada por pequenos cristalitos, com média de 0,7 nm na direção da cadeia (equivalente a 3 unidades repetitivas) e dimensões laterais de cerca de 4,1 nm (ZAIONCZ, 2006, p. 5). Experimentos realizados por White em 1960, citados por NUNES (2006, p. 50), consistindo na polimerização do MVC a -78°C no estado sólido na presença de complexos de uréia, produziram um polímero altamente sindiotático e com cristalinidade da ordem de 65%, que se mostrou insolúvel em todos os solventes e sem fusão abaixo dos 400°C, o que demonstra a importância do baixo grau de sindiotaticidade dos polímeros comerciais para viabilizar seu processamento (NUNES, 2006, p. 50). Acredita-se que a cristalinidade remanescente no PVC após o processamento atue como "ligações cruzadas virtuais" entre as moléculas, aumentando significativamente a resistência mecânica do material final, um fenômeno particularmente importante em aplicações de PVC flexível (ZAIONCZ, 2006, p. 6-7). Portanto, o controle preciso da temperatura, da agitação, do sistema dispersante e da conversão durante a polimerização é essencial para projetar a morfologia da resina – sua porosidade, tamanho de partícula e cristalinidade – de modo a atender aos requisitos específicos de cada aplicação final.

2.5. Centrifugação

A lama de PVC proveniente da polimerização, contendo entre 25% e 35% de sólidos, é submetida à centrifugação para remoção da água livre. O equipamento utilizado é um decantador centrífugo (ou centrífuga decantadora), que consiste em um bol de formato cilíndrico-cônico envolvendo uma rosca sem fim. Tanto o bol quanto a rosca giram em torno do mesmo eixo, com uma velocidade angular diferencial controlada com base no torque (SOLVIN, 2005).

A suspensão a ser tratada é introduzida no interior da câmara de alimentação e é ejetada através de canais ou janelas de alimentação, percutindo o anel líquido formado na parede do bol. As partículas em suspensão começam a sedimentar no campo centrífugo gerado pela rotação. A rosca transporta os sólidos depositados no bol em direção à região cônica, onde ocorre a desidratação, enquanto o líquido clarificado é evacuado por transbordamento (SOLVIN, 2005).

Devido às forças de capilaridade nos poros internos da partícula e às forças de adesão, a desumidificação completa do PVC não é possível apenas por centrifugação. No entanto, as forças capilares não são suficientemente fortes para reter toda a água, e a força de aceleração centrífuga é suficiente para eliminar o líquido capilar (SOLVIN, 2005). Desta forma, a centrifugação eleva a concentração de sólidos para aproximadamente 73% a 77%, formando o denominado "bolo úmido" com teor de umidade tipicamente entre 20% e 25%, que ainda requer secagem térmica.

2.6. Secagem

A secagem do PVC é uma sequência de múltiplas etapas que se inicia com a desidratação por centrifugação, seguida pela secagem térmica (geralmente envolvendo estágios pneumáticos e/ou de leito fluidizado) e finaliza com resfriamento e peneiramento. A cinética de secagem ocorre em duas etapas — primeiro a evaporação superficial, depois a evaporação dos poros — sendo a temperatura do ar de entrada a variável de controle predominante (AUBIN et al., 2014).

O trem de secagem industrial típico combina a desidratação mecânica com um ou mais estágios de secagem térmica para converter a lama (slurry) em um pó de fluxo livre. A centrifugação produz o bolo úmido que alimenta os secadores térmicos secundários, como leito fluidizado ou secador pneumático, para remover a umidade remanescente e os materiais voláteis (DORFESHAN et al., 2020). O bolo úmido é encaminhado a secadores de leito fluidizado, amplamente utilizados devido à elevada eficiência na transferência de calor e massa. Nesse sistema, as partículas são mantidas em suspensão por uma corrente de ar aquecido, promovendo intenso contato entre as fases (AUBIN et al., 2014).

A secagem ocorre em duas etapas principais: na zona úmida, há evaporação da umidade superficial com alta taxa de remoção; na zona seca, ocorre a difusão da umidade interna dos poros até a superfície da partícula. Esse comportamento está associado aos mecanismos de transferência de massa em meios porosos (AUBIN et al., 2014).

Esta descrição se alinha perfeitamente com os dois períodos de secagem descritos na literatura: período de taxa constante (controlado externamente) e período de taxa decrescente (controlado por difusão interna) (KOWALSKI, 2007).

Em uma planta industrial real operada pela Braskem no município de Marechal Deodoro, Alagoas, o processo de secagem de PVC em leito fluidizado apresenta características específicas que permitem uma análise detalhada dos parâmetros operacionais e das oportunidades de otimização (ARAÚJO et al., 2014). Nesta unidade, a lama (slurry) proveniente da polimerização contém aproximadamente 30% de PVC e 70% de água em massa. Após a centrifugação, obtém-se um bolo úmido com teor de umidade entre 20% e 30% (ARAÚJO et al., 2014). Este bolo é então alimentado em um secador de leito fluidizado horizontal, equipado com 11 conjuntos de serpentinas imersas no leito, por onde circula água quente que fornece calor adicional ao processo. O ar de fluidização é aquecido por meio de vapor de baixa pressão, e tanto o ar quanto a água quente possuem controladores PI (proporcional-integral) independentes para manter as temperaturas desejadas (ARAÚJO et al., 2014).

Os dados operacionais desta planta revelam que a temperatura do ar de entrada (TG, in) é mantida em aproximadamente 383,15 K (110 °C), enquanto a temperatura da água quente de entrada (TW,in) situa-se em torno de 353,15 K (80 °C), ambas operando no limite superior de suas faixas permitidas. A vazão de ar (FG) utilizada na operação atual é de aproximadamente 35.846 kg/h, valor significativamente superior ao considerado ótimo pelos estudos de otimização (ARAÚJO et al., 2014). O teor de umidade do bolo de entrada (XS, in) é de cerca de 0,2332 kg de água por kg de PVC seco (23,32%), enquanto o produto final apresenta um teor de umidade de saída (XS,out) de aproximadamente 0,0015 kg/kg (0,15%), valor inferior à especificação máxima permitida de 0,0020 kg/kg (0,20%) (ARAÚJO et al., 2014).

2.6.1. Fundamentos da secagem de sólidos porosos

A secagem de materiais porosos é um processo complexo que envolve fenômenos acoplados de transferência de calor e massa ocorrendo simultaneamente em diferentes escalas — desde a superfície externa da partícula até o interior de sua estrutura porosa. De acordo com Kowalski (2007), a secagem de sólidos porosos depende tanto das propriedades físicas e morfológicas do material quanto das condições operacionais do equipamento utilizado. No caso específico do PVC, a compreensão desses fundamentos é essencial para otimizar o processo e garantir a qualidade final da resina.

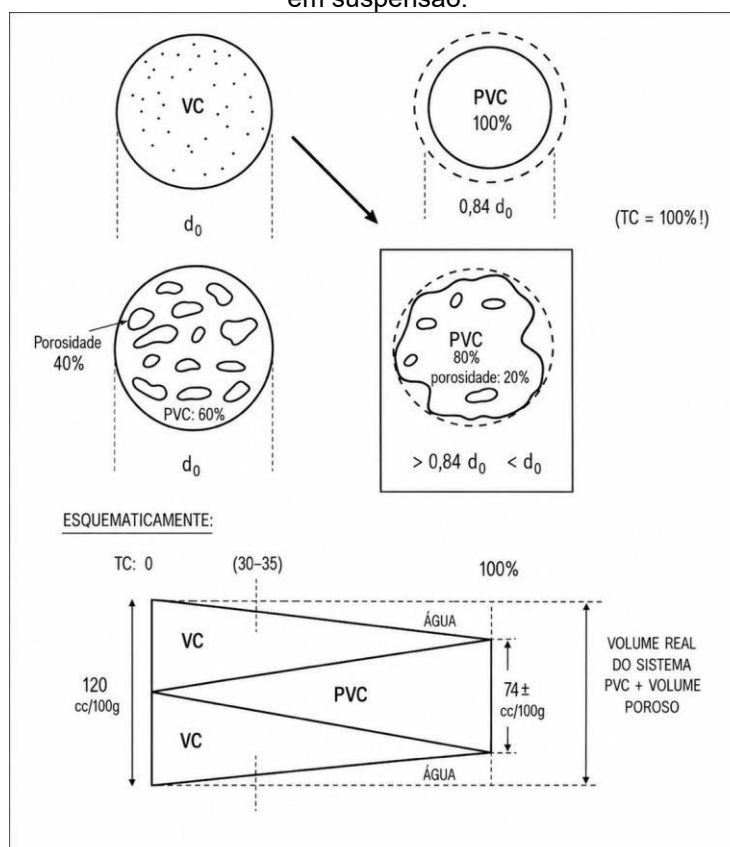
A secagem de um material poroso ocorre quando o calor é fornecido ao sistema (geralmente por ar aquecido), promovendo a evaporação da água contida no material, e o vapor gerado é removido pela corrente de ar. Este processo envolve três etapas fundamentais: o transporte da água líquida através do material até a superfície, o fornecimento de energia para evaporar essa água, e a difusão do vapor da superfície para o ar (SOLVIN, 2005)

A compreensão da distribuição da água no interior de um material poroso é fundamental para entender seu comportamento durante a secagem.

De acordo com a literatura de secagem de materiais biológicos e porosos, a água pode ser classificada em diferentes estados termodinâmicos: água livre (ou bulk water) e água ligada (bound water) (KERR, 2023). A água livre comporta-se como água pura, estando presente em macroporos e na superfície das partículas, sendo facilmente removível por evaporação convencional. Já a água ligada está associada a sítios polares da matriz sólida por forças de adsorção ou capilaridade, requerendo maior energia para sua remoção (KERR, 2023).

Este conceito é análogo ao observado na secagem do PVC, onde a água presente nos macroporos (diâmetro superior a 250 nm) comporta-se como água livre, sendo removida rapidamente no período de taxa constante do secador pneumático. Por outro lado, a água retida nos mesoporos (diâmetro entre 10 e 250 nm) apresenta características de água ligada, demandando maior tempo de residência e sendo removida apenas no período de taxa decrescente do secador de leito fluidizado (AUBIN et al., 2014). Esta distinção explica por que a secagem do PVC ocorre em duas etapas distintas e por que a remoção da umidade residual é mais lenta e energeticamente mais custosa.

Figura 5 – Representação esquemática da formação da porosidade durante a polimerização do PVC em suspensão.



Fonte: SOLVIN. PVC-S: Essorage, Secagem, Morfologia. Material de treinamento técnico, 2005.

Conforme ilustrado na Figura 5, a porosidade da partícula de PVC é formada durante a própria reação de polimerização. No início do processo (0% de conversão), a gota contém apenas monômero cloreto de vinila (VC) e água. À medida que a polimerização avança (40% de conversão), formam-se cadeias de PVC que precipitam, coexistindo com o monômero residual.

Ao final da reação (100% de conversão), obtém-se uma partícula de PVC cujo volume real é superior ao volume inicial da gota de monômero, devido aos espaços vazios deixados pela saída da água e do monômero não reagido. Estes vazios são os poros que conferem à resina sua capacidade de absorção de plastificantes e influenciam diretamente o comportamento da partícula durante a secagem (SOLVIN, 2005; AUBIN et al., 2014).

2.6.2. Mecanismos de transferência de calor e massa

A transferência de calor durante a secagem de partículas de PVC em leito fluidizado ocorre predominantemente por convecção entre o ar quente e as partículas, sendo intensificada pela alta turbulência e pela grande área de contato características do leito fluidizado (KOWALSKI, 2007). Adicionalmente, quando há trocadores de calor internos imersos no leito (como serpentinas ou placas), a transferência de calor por condução também contribui significativamente para o processo, com coeficientes de transferência de calor tipicamente entre 100 e 500 W/m²·K (MUJUMDAR & LAW, 2015).

A transferência de massa, por sua vez, envolve a remoção do vapor d'água gerado no interior da partícula. A força motriz para esta transferência é a diferença entre a pressão de vapor na superfície da partícula e a pressão parcial de vapor no ar de secagem: quanto maior essa diferença, maior a taxa de remoção de água (PERAZZINI, 2014). No entanto, à medida que a secagem avança e a frente de evaporação se desloca para o interior da partícula, o caminho difusivo do vapor se alonga, aumentando a resistência à transferência de massa e reduzindo a taxa de secagem (AUBIN et al., 2014).

2.6.3. Mecanismos de transporte de umidade no interior da partícula

O vapor d'água gerado no interior da matriz sólida do PVC difunde-se ao longo dos poros segundo diferentes mecanismos. A difusão ordinária ocorre quando os poros são relativamente grandes (maiores que 0,1 µm) e é o mecanismo predominante nos macroporos da partícula de PVC. A difusão de Knudsen (ou efusão) ocorre quando o tamanho dos poros é menor que o caminho livre médio das moléculas de vapor d'água, tipicamente para diâmetros de poros entre 2 nm e 50 nm, podendo ser significativa nos mesoporos do PVC (PERAZZINI, 2014). O número de Knudsen é utilizado para identificar qual mecanismo é limitante: quando seu valor é superior a 1, a difusão de Knudsen predomina.

Além da difusão de vapor, o movimento da água no estado líquido no interior da partícula também pode ocorrer por diferentes mecanismos. A capilaridade refere-se ao movimento do líquido devido às forças de atração entre as moléculas de água e entre a água e as paredes do poro (WANG, CHEN & MUJUMDAR, 2007). A difusão superficial ocorre quando as moléculas de água interagem fortemente com as paredes dos poros, movendo-se ao longo delas (PERAZZINI, 2014). No entanto, para o PVC, estudos indicam que a baixa afinidade do polímero com a água (ângulo de contato entre 80° e 94,7°) torna a capilaridade e a difusão superficial menos relevantes, sendo a difusão de vapor o mecanismo predominante (AUBIN et al., 2014).

Segundo Wang, Chen e Mujumdar (2007), a literatura reconhece que os modelos clássicos de transporte em meios porosos são suficientes para tratar o processo de secagem em nível fundamental, embora a medição de propriedades desconhecidas e a validação experimental ainda necessitem de melhorias. Os autores destacam que o projeto, a operação e a otimização de secadores industriais requerem modelos matemáticos abrangentes que conciliem precisão, generalidade e simplicidade.

2.6.4. Sinterização e formação de cenosferas

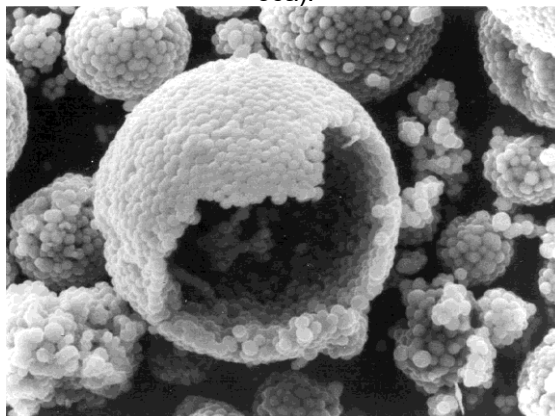
Após a secagem, o grão de PVC apresenta uma estrutura característica denominada cenosfera (do inglês *cenosphere*), que se assemelha a uma casca oca resultante do processo de secagem e das condições térmicas aplicadas (SOLVIN, 2005). Esta estrutura é formada durante o processo de secagem devido ao fenômeno de sinterização: com o aumento da temperatura, as partículas primárias de látex tendem a se coalescer e a "grudar" umas nas outras, formando uma estrutura mais coesa e resistente (SOLVIN, 2005).

De acordo com a literatura especializada, uma partícula de PVC úmida pode ser descrita como uma pastilha constituída por aglomerados de partículas primárias (grãos não porosos), cujo espaço intersticial está preenchido por água (AUBIN et al., 2014). Devido à baixa afinidade da água com o PVC — caracterizada pelo alto ângulo de contato e pela baixa umidade de equilíbrio — e às grandes dimensões dos poros, os mecanismos de capilaridade e difusão em fase líquida podem ser negligenciados, sendo a difusão do vapor d'água nos poros o mecanismo predominante no controle da cinética de secagem (AUBIN et al., 2014).

A sinterização é influenciada predominantemente pela temperatura de saída do secador e, em menor extensão, pela temperatura de entrada. O tempo de residência da partícula em alta temperatura dentro da câmara de secagem (e nos sistemas de filtragem) também desempenha um papel importante na determinação do grau de sinterização. Evidentemente, o tempo de residência deve ser suficiente para permitir a remoção total da água, mas não tão longo a ponto de causar sinterização excessiva (SOLVIN, 2005).

O grau de sinterização das partículas primárias é de enorme importância para a estrutura e as propriedades do pó final de PVC, influenciando também diversas propriedades dos plastisóis (dispersões de PVC em plastificante). Para avaliar esta propriedade, mede-se a compressibilidade do pó, que está diretamente ligada à resistência mecânica das cenosferas (SOLVIN, 2005).

Figura 6 – Estrutura de um grão de PVC após secagem, mostrando a formação da cenosfera (casca oca).



Fonte: SOLVIN. PVC-S: Essorage, Secagem, Morfologia. Material de treinamento técnico, 2005.

2.6.5. Etapas da secagem: período de taxa constante e taxa decrescente

A secagem de partículas porosas, incluindo o PVC, ocorre em etapas distintas, cada qual controlada por mecanismos físicos diferentes. Estas etapas são conhecidas como período de taxa constante e período de taxa decrescente, sendo amplamente descritas na literatura de transferência de massa (KOWALSKI, 2007; SOLVIN, 2005).

Período de taxa constante (zona úmida): Nesta primeira etapa, a água presente na superfície externa da partícula e nos macroporos mais próximos da superfície é evaporada rapidamente. Durante esse período, a superfície da partícula permanece saturada, e a taxa de remoção de água é controlada pelas condições externas — especificamente, pela temperatura, velocidade e umidade do ar de secagem. A temperatura do sólido permanece constante e igual à temperatura de bulbo úmido, sendo a taxa de secagem controlada exclusivamente pela taxa de transferência de calor externa, independentemente da natureza do sólido (SOLVIN, 2005). Para o PVC, este período corresponde à remoção da água presente nos macroporos, que representam cerca de 93% do volume poroso total da partícula (AUBIN et al., 2014).

Período de taxa decrescente (zona seca): Após a remoção da água superficial e daquela contida nos macroporos mais externos, forma-se uma crosta seca na periferia da partícula, enquanto o núcleo central ainda permanece úmido. Nesta segunda etapa, o transporte de umidade à superfície não é suficientemente rápido para renovar o filme evaporado, fazendo com que a superfície seque e sua temperatura se eleve (SOLVIN, 2005). A taxa de secagem agora é controlada por mecanismos internos de transferência de massa — especificamente, pela difusão do vapor d'água através da crosta seca até a superfície da partícula, tornando-se independente das condições externas do ar (PERAZZINI, 2014; SOLVIN, 2005). Este processo é mais lento que o da primeira etapa e a taxa de secagem diminui progressivamente ao longo do tempo, até que a partícula atinja o teor de umidade de equilíbrio. É nesta segunda etapa que ocorre a remoção da água retida nos mesoporos (cerca de 7% do volume poroso total), a qual demanda tempos de residência mais longos (AUBIN et al., 2014).

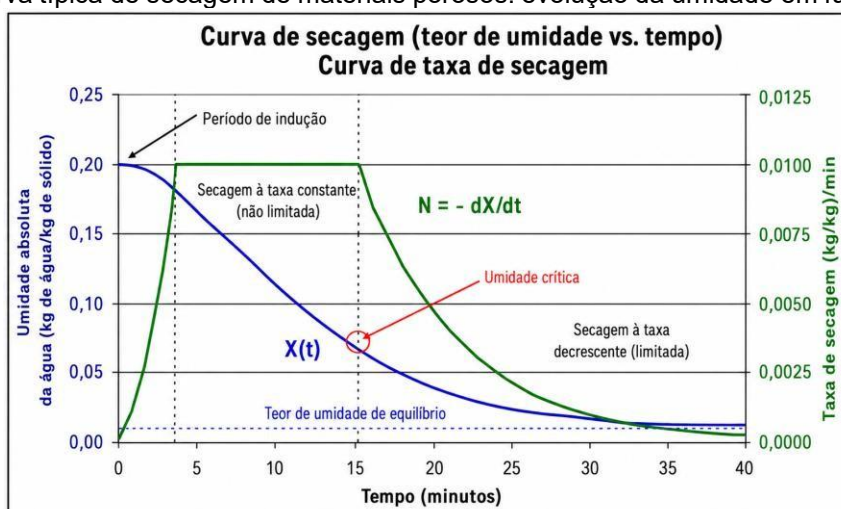
Segundo Xu, Sasmito e Mujumdar (2020), a compreensão dos fenômenos de transferência de calor e massa em meios porosos é fundamental para o projeto e otimização de secadores industriais. Os autores destacam que modelos em escala de poro e em escala macro, além de diversas tecnologias de secagem, deve ser considerados para uma abordagem abrangente do problema.

Quando a estrutura interna do meio poroso exerce o controle na transferência de umidade (período de taxa decrescente), a superfície da partícula apresenta baixa concentração de líquido, ficando praticamente seca nos instantes finais da secagem. Nesta etapa, os gradientes de temperatura são mais elevados, pois a temperatura superficial aumenta do valor de bulbo úmido em direção à temperatura do ar de secagem (PERAZZINI, 2014).

2.6.6. Curva característica de secagem

A cinética de secagem de materiais porosos pode ser representada graficamente por meio de curvas características que relacionam o teor de umidade do material ao tempo de exposição no secador. Estas curvas permitem visualizar claramente as diferentes etapas do processo de secagem e são fundamentais para o dimensionamento e a otimização de secadores industriais (SOLVIN, 2005). A secagem de materiais porosos segue uma curva na qual a umidade decresce ao longo do tempo, podendo ser distinguidas três etapas distintas: aquecimento inicial (indução), taxa constante e taxa decrescente (SOLVIN, 2005).

Figura 7 – Curva típica de secagem de materiais porosos: evolução da umidade em função do tempo.



Fonte: SOLVIN. Módulo V: PVC Solids Drying. Material de treinamento técnico, 2005.

3. TIPOS DE SECADORES

A etapa de secagem do PVC possui grande importância industrial, pois influencia diretamente a umidade residual, a qualidade da resina e o consumo energético do processo. Um estudo conduzido pelo Laboratoire de Génie Chimique de Toulouse em parceria com o grupo INEOS ChlorVinyls demonstrou que a secagem do PVC é controlada por uma competição entre transferências externas e internas de calor e massa. O processo consome entre 800 e 1500 kJ por kg de PVC seco, dependendo das condições operacionais e do grau da resina processada, representando cerca de 30% do custo total de produção (AUBIN et al., 2014).

Entre os principais equipamentos utilizados na indústria para essa etapa destacam-se os secadores pneumáticos (flash dryer) e secadores de leito fluidizado, cada um apresentando características específicas de transferência de calor, eficiência e controle operacional.

3.1. Secador pneumático (Flash Dryer)

No primeiro estágio da secagem do PVC, o bolo úmido proveniente da centrifugação é alimentado em um secador pneumático (flash dryer), onde é disperso em uma corrente de ar quente em alta velocidade. Este equipamento consiste essencialmente em um duto de secagem vertical (tipicamente de seção transversal circular uniforme), um sistema de alimentação de material úmido, um aquecedor de gás, um sistema de separação gás-sólido (como ciclones) e um ventilador de exaustão (BORDE & LEVY, 2014). Os secadores flash são frequentemente utilizados como o primeiro estágio de um sistema de secagem em dois estágios, removendo a umidade superficial de forma rápida e econômica, enquanto um secador de maior tempo de residência (como o leito fluidizado) é empregado como segundo estágio para remoção da umidade residual (MUJUMDAR, 2009). Esta configuração, adotada por grandes produtores como a INEOS ChlorVinyls, permite conciliar alta produtividade com baixa umidade residual (AUBIN et al., 2014).

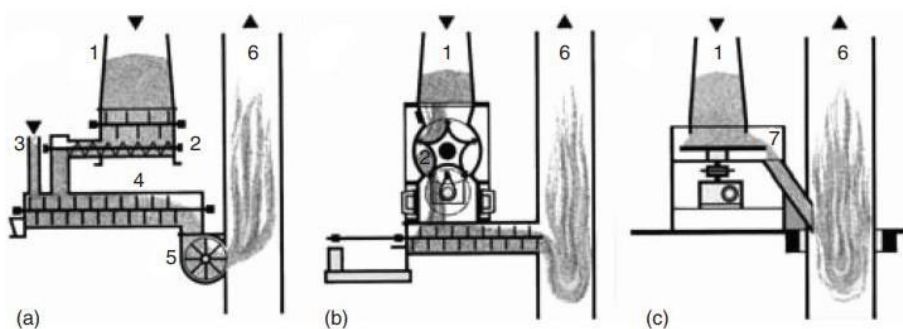
O princípio de funcionamento baseia-se no transporte pneumático em fase diluída: a velocidade do ar deve ser superior à velocidade terminal de queda livre da maior partícula a ser secada, garantindo que todas as partículas sejam arrastadas pela corrente gasosa. A faixa de tamanho de partículas processadas em flash dryers situa-se tipicamente entre 10 e 500 μm (BORDE & LEVY, 2014). Este equipamento opera com tempos de residência extremamente curtos (da ordem de segundos), tipicamente na faixa de 0,5 a 10 segundos, sendo função do comprimento do duto, da velocidade do ar e das propriedades das partículas (BORDE & LEVY, 2014). Devido ao curto tempo de exposição, a temperatura do material permanece baixa durante todo o processo, o que torna o flash dryer particularmente adequado para a remoção de umidade superficial de materiais termossensíveis.

O secador pneumático é responsável pela remoção da água superficial presente nos macroporos da partícula, que corresponde a aproximadamente 93% do volume de água total a ser removido (AUBIN et al., 2014). A alta eficiência de remoção de umidade neste estágio decorre da grande área superficial de contato entre as partículas e o gás, bem como dos elevados coeficientes de transferência convectiva de calor e massa característicos do escoamento em fase diluída (BORDE & LEVY, 2014).

A temperatura do ar de entrada neste estágio pode variar entre 130 °C e 190 °C, com velocidades entre 15 e 50 m/s (BANOONI et al., 2018). A escolha desses parâmetros deve considerar que, embora temperaturas mais elevadas aumentem a taxa de secagem, a exposição térmica cumulativa (produto da temperatura pelo tempo de residência) deve permanecer dentro dos limites de estabilidade térmica do PVC. Em secadores pneumáticos, a exposição térmica é limitada devido ao tempo de residência extremamente curto, o que justifica a utilização de temperaturas mais elevadas do que as empregadas em leitos fluidizados.

Após a passagem pelo secador pneumático, as partículas são separadas do fluxo de ar por meio de sistemas de separação, que podem incluir ciclones, filtros de manga, precipitadores eletrostáticos ou scrubbers úmidos, dependendo das características do material e das exigências ambientais (BORDE & LEVY, 2014).

Figura 8 – Sistemas típicos de alimentação para secadores pneumáticos flash: (1) silo de produto úmido; (2) medidor; (3) produto recirculado; (4) misturador; (5) dispositivo de dispersão; (6) tubo do secador flash; (7) alimentador de disco.



Fonte: BORDE, I.; LEVY, A. Pneumatic and flash drying. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). Handbook of Industrial Drying. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2014. p. 399.

3.2. Secador de leito fluidizado

O secador de leito fluidizado, amplamente utilizado na indústria de PVC, baseia-se no princípio da fluidização: quando um gás (ar quente) passa através de uma camada de partículas sólidas com velocidade suficiente para suspender as partículas, o leito comporta-se como um fluido em ebulição, promovendo intensa mistura e excelente contato entre as fases sólida e gasosa (MUJUMDAR & LAW, 2015). Este equipamento é capaz de processar materiais com ampla faixa granulométrica, tipicamente entre 0,003 e 6 mm (MUJUMDAR & LAW, 2015).

Na indústria de PVC, o secador de leito fluidizado é empregado como segunda etapa em um sistema de secagem em dois estágios. O primeiro estágio (secador pneumático ou flash dryer) remove a maior parte da água superficial em um tempo muito curto (cerca de 2 segundos). Em seguida, o material, que ainda contém umidade residual nos poros das partículas, é encaminhado ao secador de leito fluidizado, onde a remoção da umidade interna ocorre de forma mais lenta, sendo este processo de difusão cerca de 100 a 1000 vezes mais demorado do que a remoção da umidade superficial (YAO ZUN, 2021).

O secador de leito fluidizado industrial é tipicamente construído na configuração horizontal, com seu interior dividido por placas verticais (vertedouros) que criam de 4 a 8 câmaras ou compartimentos sequenciais (YAO ZUN, 2021). Estas placas possuem um pequeno espaço na parte inferior (da ordem de dezenas de milímetros) que permite a passagem do material de uma câmara para a seguinte (YAO ZUN, 2021). Na parte inferior do equipamento, uma placa distribuidora (também chamada de grelha) garante que o ar de fluidização seja distribuído uniformemente por toda a área do leito, evitando a formação de zonas mortas ou caminhos preferenciais do ar (YAO ZUN, 2021). Estudos experimentais determinaram que a faixa de operação típica para fluidização de PVC está entre 0,41 e 0,55 m/s (AUBIN et al., 2014).

O material pré-secado é então encaminhado ao secador de leito fluidizado. Devido à intensa mistura e ao movimento de "rolamento" das partículas no leito, o contato entre o sólido e o gás é maximizado, resultando em uma rápida transferência de calor e massa (YAO ZUN, 2021). As temperaturas do leito fluidizado são mantidas entre 30 °C e 60 °C, pois valores superiores a 70 °C podem tornar a superfície do PVC pegajosa, causando aglomeração no leito (AUBIN et al., 2014). O secador industrial é geralmente compartimentado em múltiplos estágios (normalmente de 4 a 8 compartimentos), permitindo que o material flua sequencialmente enquanto o ar quente promove a secagem progressiva (AUBIN et al., 2014).

Na última câmara do secador, ao invés de ar quente, introduz-se ar frio ou ar ambiente para resfriar o produto antes de seu descarregamento e ensacamento (AUBIN et al., 2014). Esta etapa é fundamental para evitar que o calor residual cause degradação térmica do polímero ou que a umidade se recondense durante o armazenamento (AUBIN et al., 2014).

Em muitos secadores de leito fluidizado industriais, especialmente os utilizados para secagem de polímeros como PVC, são instalados trocadores de calor internos (serpentinas ou placas) imersos no leito fluidizado, por onde circula água quente ou vapor (MUJUMDAR & LAW, 2015). Estes elementos de aquecimento submersos aumentam significativamente a eficiência térmica do processo, pois o coeficiente de transferência de calor entre o leito fluidizado e as superfícies imersas é muito elevado, tipicamente na faixa de 100 a 500 W/m²·K (MUJUMDAR & LAW, 2015). De acordo com dados de fornecedores de equipamentos, sistemas de leito fluidizado com placas de aquecimento submersas são amplamente utilizados para secagem de S-PVC, com faixa de tamanho de partícula entre 50 e 800 µm (GEA, 2024).

De acordo com Mujumdar (2009), os secadores de leito fluidizado oferecem vantagens significativas para a secagem de sólidos particulados, incluindo altas taxas de secagem, alta eficiência térmica, baixa área de piso ocupada e facilidade de controle. Para materiais termossensíveis, como polímeros, o uso de trocadores de calor imersos no leito permite a utilização de temperaturas mais baixas do ar de fluidização sem aumento do tempo de secagem (MUJUMDAR, 2009).

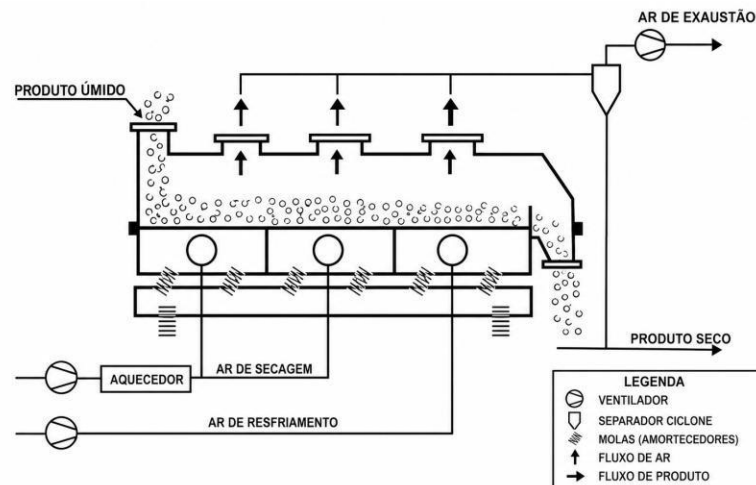
Os secadores de leito fluidizado podem ser classificados em quatro tipos principais (MUJUMDAR, 2009):

- Leito fluidizado bem misturado (well-mixed): o mais comum, adequado quando uma pequena variação na umidade final do produto é aceitável devido à distribuição de tempo de residência inerente ao equipamento;

- Leito fluidizado de fluxo pistão (plug flow): recomendado quando é necessário garantir tempo de residência quase uniforme das partículas, sendo frequentemente construído com geometria retangular e grandes relações de aspecto;
- Leito fluidizado vibratório (vibrated fluidized bed): indicado para partículas de difícil fluidização devido ao grande tamanho, ampla distribuição granulométrica ou pegajosidade superficial. A aplicação de vibração vertical na faixa de 5 a 20 Hz com amplitude de 3 a 5 mm facilita a separação das partículas, reduzindo a necessidade de altas velocidades do ar e minimizando a atrição;
- Leito fluidizado com jato (spouted bed): utilizado para partículas grandes de difícil fluidização, onde o ar entra como um jato e causa um movimento recirculatório regular das partículas no interior do vaso.

Quando se manuseiam produtos granulados de difícil fluidização — devido ao grande tamanho, ampla distribuição granulométrica ou pegajosidade superficial — pode ser necessário o auxílio mecânico para dispersar o leito de partículas. A aplicação de vibração vertical (5 a 20 Hz, amplitude de 3 a 5 mm) facilita a separação das partículas, permitindo a pseudo-fluidização com velocidades de ar muito baixas, resultando em taxas de secagem comparáveis às obtidas em leitos convencionais, porém com menor consumo de energia e menor atrição das partículas (MUJUMDAR, 2009).

Figura 9 – Esquema de um secador de leito fluidizado.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.3. Vantagem dos sistemas multiestágio

Configurações de dois estágios (pneumático + leito fluidizado) têm demonstrado experimental e numericamente um menor consumo específico de energia em comparação com sistemas de estágio único para secagem de PVC de suspensão (DORFESHAN et al., 2020).

Após atingir os níveis alvo de umidade (inferior a 0,3%) e voláteis, o material é resfriado, peneirado e descarregado, sendo o monitoramento de voláteis comumente incluído no projeto da linha de produção (DORFESHAN et al., 2020; GRAUER et al., 1992).

Quadro 1 - Comparação entre tipos de secadores na indústria de PVC

<i>Tipo de secador</i>	<i>Princípio de funcionamento</i>	<i>Vantagens típicas</i>	<i>Observações operacionais</i>
Leito fluidizado	Ar quente introduzido por distribuidor fluidiza as partículas; transferência de calor convectiva seca o leito	Alta eficiência de transferência de calor e massa; boa uniformidade para secagem de pós finos (BANOONI et al., 2018)	Temperaturas de operação: 30-60°C; velocidade do ar: 0,41-0,55 m/s; pode incluir trocadores de calor internos (YEUEXIAN et al., 2017)
Pneumático / Flash	Transporte em fase diluída em corrente de ar quente; tempo de residência curto com separação em ciclone	Tempo de residência muito curto, adequado para materiais termossensíveis; bom para pré-secagem (BANOONI et al., 2018)	Temperaturas de entrada: 130-190°C; velocidades do ar: 15-50 m/s; requer ciclone a jusante (BANOONI et al., 2018)

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Dorfeshan et al. (2020); Banooni et al. (2018); Yuxian et al. (2017); Ying et al. (2016).

3.4. Aspectos Teóricos

Zonas de secagem: A secagem de partículas poliméricas em leito fluidizado ocorre em duas etapas distintas:

Período de taxa constante (zona úmida): controlado pela transferência de calor por convecção, onde a evaporação da água superficial ocorre rapidamente;

Período de taxa decrescente (zona seca): governado por mecanismos difusivos internos, nos quais a umidade migra do interior da partícula até a superfície.

Esse comportamento é amplamente descrito na literatura de transferência de massa, sendo característico de sólidos porosos.

Transferência de calor: No leito fluidizado, a transferência de calor ocorre predominantemente por convecção entre o ar quente e as partículas, sendo intensificada pela alta área de contato e turbulência do sistema. Adicionalmente, a presença de trocadores internos alimentados por vapor contribui para a estabilidade térmica do processo. O coeficiente de transferência de calor em leitos fluidizados é significativamente superior ao de leitos fixos, podendo atingir valores entre **100 e 500 W/m²·K**, dependendo das condições operacionais.

Balanco de energia: É descrito por:

$$Q_T = Q_{ar} + Q_{vapor} = m_{agua} \cdot \lambda + m_{PVC} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

onde;

Q_T = calor total fornecido

$m_{agua} \cdot \lambda$ = calor latente de evaporação

$m_{PVC} \cdot C_p \cdot \Delta T$ = aquecimento do sólido

Na prática industrial, cerca de 70% a 85% da energia é consumida na evaporação da água, sendo esse o principal foco de otimização energética.

4. PARÂMETROS OPERACIONAIS

Os parâmetros operacionais são as variáveis que podem ser controladas durante o processo de secagem para influenciar diretamente a eficiência da remoção de umidade, a qualidade final da resina e o consumo energético. Estudos de modelagem e experimentos realizados em secadores pneumáticos e de leito fluidizado identificam a temperatura do ar de entrada como o parâmetro mais influente na taxa de secagem, enquanto os gradientes internos de temperatura e umidade (difusão de água pelos poros) controlam a etapa mais lenta da secagem (AUBIN et al., 2014; MEZHERICHER et al., 2010).

4.1 Temperatura

A temperatura do ar de secagem é amplamente reconhecida como o parâmetro operacional de maior impacto sobre o desempenho do processo de secagem do PVC. Experimentos conduzidos em leito fluidizado demonstraram que a elevação da temperatura do leito de 35 °C para 55 °C reduz o tempo de secagem de aproximadamente 40 segundos para 24 segundos, evidenciando a forte correlação entre esta variável e a cinética de remoção de água (AUBIN et al., 2014). Este efeito decorre do aumento simultâneo da força motriz para transferência de calor (diferença de temperatura entre o ar e a partícula) e para transferência de massa (diferença entre a pressão de vapor na superfície da partícula e a pressão parcial de vapor no ar de secagem).

Em termos quantitativos, a influência da temperatura é tão significativa que modelos matemáticos de secagem pneumática a identificam como o parâmetro dominante no controle da taxa global de secagem (AUBIN et al., 2014). No entanto, a temperatura não pode ser elevada indiscriminadamente, pois o PVC é um polímero termossensível. A literatura e os dados operacionais de plantas industriais indicam que a temperatura máxima segura para o ar de entrada em secadores de leito fluidizado situa-se em torno de 130 °C a 140 °C, embora o contato direto com as partículas seja rapidamente atenuado pela evaporação da água, mantendo a temperatura da partícula em níveis mais baixos. O vapor utilizado nos trocadores de calor internos opera tipicamente na faixa de 100 °C a 125 °C.

Um limite crítico que deve ser rigorosamente observado é a temperatura do leito fluidizado. Estudos experimentais demonstraram que temperaturas do leito superiores a 70 °C tornam a superfície do PVC pegajosa, resultando em aglomeração das partículas, perda de fluidização e, conseqüentemente, comprometimento da qualidade do produto (AUBIN et al., 2014). Por esta razão, as temperaturas do leito são normalmente mantidas na faixa de 30 °C a 60 °C, assegurando condições seguras de operação. Para secadores pneumáticos (flash dryers), nos quais o tempo de residência é extremamente curto (da ordem de poucos segundos), temperaturas mais elevadas podem ser utilizadas, tipicamente entre 130 °C e 190 °C, sem que ocorra degradação térmica significativa, uma vez que a exposição térmica cumulativa (produto da temperatura pelo tempo) permanece limitada (DORFESHAN et al., 2020).

A temperatura também influencia a cinética de secagem em nível molecular. Estudos de cinética de secagem do PVC em pó, realizados por Suherman et al. (2017), determinaram que a constante de difusão da água através da matriz polimérica varia entre $4,6 \times 10^{-12}$ e $1,44 \times 10^{-11}$ m²/s na faixa de temperatura de 40 °C a 80 °C, com uma energia de ativação de 25,74 kJ/mol. Estes valores indicam que o processo difusivo é sensível à temperatura, justificando-se o uso de temperaturas moderadamente elevadas para acelerar a remoção da água dos poros, desde que respeitados os limites de segurança térmica do material.

4.2 Vazão

A vazão e a velocidade do ar de secagem constituem parâmetros inter-relacionados que afetam tanto a hidrodinâmica do leito fluidizado quanto a eficiência das transferências convectivas de calor e massa. Em secadores de leito fluidizado, a velocidade superficial do ar deve ser suficiente para suspender as partículas e promover a fluidização, mas não tão elevada a ponto de causar arraste excessivo de partículas finas. Para partículas de PVC com diâmetro médio em torno de 200 µm, a velocidade mínima de fluidização é de aproximadamente 0,08-0,10 m/s, enquanto a velocidade de arraste situa-se em torno de 0,65 m/s. Estudos experimentais realizados em escala laboratorial determinaram que a faixa de operação típica para fluidização de pós de PVC situa-se entre 0,41 e 0,55 m/s (AUBIN et al., 2014).

A influência da velocidade do ar sobre a cinética de secagem é significativa. Experimentos conduzidos variando a vazão de ar de 9,2 kg/h para 12,4 kg/h demonstraram uma redução no tempo de secagem de 53 segundos para 36 segundos (AUBIN et al., 2014). Este efeito decorre do aumento do coeficiente de transferência convectiva com a velocidade relativa entre as partículas e o gás, que intensifica tanto o aquecimento da partícula quanto a remoção do vapor d'água de sua superfície.

Em secadores pneumáticos (flash dryers), as velocidades do ar são consideravelmente mais elevadas, tipicamente na faixa de 15 a 50 m/s, com o objetivo de transportar as partículas em fase diluída e promover um contato intenso com o ar quente em um tempo de residência extremamente curto (DORFESHAN et al., 2020). Nesta configuração, a alta velocidade do ar é essencial para a) dispersar o bolo úmido de alimentação, b) evitar a aglomeração das partículas e c) maximizar a área de contato entre as fases sólida e gasosa. Entretanto, velocidades excessivamente altas podem resultar em maior geração de finos por atrito e no arraste de partículas de pequeno diâmetro para os ciclones, exigindo sistemas de separação eficientes para a recuperação do produto.

A vazão volumétrica de ar também tem impacto direto sobre o consumo energético do processo. Vazões mais elevadas demandam maior potência dos ventiladores e aumentam as perdas de calor no gás de exaustão, a menos que sistemas de recuperação de calor sejam empregados. Por esta razão, o projeto de secadores industriais busca equilibrar a necessidade de remoção eficiente de umidade com a minimização do volume de ar de processo, frequentemente mediante o uso de trocadores de calor internos ou sistemas de recirculação parcial do ar de exaustão.

4.3 Umidade

A umidade do ar utilizado na secagem e a umidade inicial do bolo de PVC alimentado ao secador determinam conjuntamente a força motriz disponível para a transferência de massa entre a partícula e o gás. Quanto mais seco o ar de entrada (menor umidade absoluta), maior a diferença entre a pressão de vapor na superfície da partícula (que é a pressão de saturação na temperatura da partícula) e a pressão parcial de vapor no ar, resultando em uma taxa de evaporação mais elevada.

Estudos experimentais conduzidos por Aubin et al. (2014) demonstraram que a elevação da umidade absoluta do ar de entrada de 16 g de água/kg de ar seco para 25 g de água/kg de ar seco aumenta o tempo de secagem de 55 segundos para 84 segundos, evidenciando o impacto significativo deste parâmetro sobre a cinética de remoção de água. Por esta razão, o controle da umidade do ar de entrada é particularmente importante em regiões de clima úmido ou em épocas do ano nas quais a umidade atmosférica é elevada, podendo justificar o uso de sistemas de desumidificação ou de pré-aquecimento do ar para reduzir sua umidade relativa.

A umidade do bolo de alimentação, por sua vez, define a carga térmica a ser fornecida pelo secador. O bolo proveniente da centrifugação apresenta tipicamente um teor de umidade entre 0,20 e 0,35 kg de água por kg de PVC seco, o que corresponde a uma concentração de sólidos entre 74% e 83% (AUBIN et al., 2014).

Flutuações neste parâmetro afetam diretamente a demanda de energia do processo e podem levar a instabilidades operacionais se não forem adequadamente compensadas por ajustes na temperatura ou na vazão de ar. Variações na alimentação ou na umidade do bolo podem provocar instabilidades na fluidização, resultando em colapso do leito ou arraste excessivo de partículas finas. A implementação de sensores de umidade em linha, associados a sistemas de controle automático da alimentação, permite maior estabilidade operacional, redução de desperdícios energéticos e maior uniformidade do produto final. Quando a umidade do bolo de alimentação é elevada, a pré-secagem em um estágio adicional (como um secador pneumático antes do leito fluidizado) pode reduzir significativamente a carga sobre o secador principal, diminuindo o consumo específico de energia (BANOONI et al., 2018).

4.4 Tempo de Residência

O tempo de residência das partículas no secador é um parâmetro crítico, especialmente para a remoção da água retida nos mesoporos — a porosidade fina da partícula que corresponde a aproximadamente 7% do volume poroso total, mas que requer um tempo de exposição mais prolongado para que a difusão do vapor através

da crosta seca se complete (AUBIN et al., 2014). Enquanto a água superficial e aquela contida nos macroporos (cerca de 93% do volume de água total) pode ser removida em segundos no secador pneumático, a umidade residual dos mesoporos demanda tempos de residência da ordem de horas em leitos fluidizados.

Em sistemas de leito fluidizado industrial, o tempo de residência típico varia de 3 a 5 horas, sendo calculado como a razão entre o volume de material mantido no leito e a vazão volumétrica de PVC alimentada. Tempos de residência insuficientes resultam em produto fora da especificação de umidade residual, que tipicamente deve ser inferior a 0,3% em massa (base úmida) conforme especificações industriais de referência. enquanto tempos excessivos reduzem a produtividade do equipamento e aumentam o risco de degradação térmica por exposição prolongada ao calor.

Uma estratégia eficaz para otimizar o tempo de residência global do processo é a utilização de sistemas multiestágio, nos quais o secador pneumático opera com tempo de residência muito curto (segundos) para remover a maior parte da água, e o leito fluidizado subsequente opera com tempo de residência mais longo (horas) para completar a remoção da umidade residual. Esta configuração, adotada por grandes produtores como a INEOS ChlorVinyls e documentada por Aubin et al. (2014), permite conciliar alta produtividade com baixa umidade residual, reduzindo o consumo específico de energia

4.5 Granulometria

Distribuição granulométrica da resina PVC exerce influência direta sobre a dinâmica da fluidização, a área superficial disponível para as trocas térmicas e mássicas, e o risco de arraste de partículas finas. As partículas comerciais de PVC obtidas por polimerização em suspensão apresentam tipicamente uma distribuição granulométrica log-normal, com diâmetros característicos $d_{10} = 104 \mu\text{m}$, $d_{50} = 144 \mu\text{m}$ e $d_{90} = 199 \mu\text{m}$ (AUBIN et al., 2014). Partículas muito finas (diâmetro inferior a $20 \mu\text{m}$) tendem a ser arrastadas pelo fluxo de ar, exigindo sistemas de separação eficientes como ciclones e filtros de manga para sua recuperação; partículas muito grandes, por outro lado, podem apresentar dificuldade de fluidização e maior resistência à difusão da umidade interna.

A influência da granulometria sobre a cinética de secagem decorre principalmente de dois fatores: a área superficial específica (maior para partículas menores) e o caminho difusivo (menor para partículas menores). Modelagens realizadas por Aubin et al. (2014) indicam que, embora a distribuição granulométrica influencie o processo, o uso da hipótese de monodispersão (partículas de tamanho uniforme) não altera significativamente os resultados para a secagem do PVC, dada a relativa estreiteza da faixa granulométrica típica.

É importante observar que o próprio processo de secagem pode alterar a distribuição granulométrica da resina. A fluidização agressiva, o fluxo de ar em alta velocidade ou a presença de sistemas de agitação mecânica podem causar atrição das partículas, gerando finos que são posteriormente arrastados. Por esta razão, o projeto do secador deve considerar não apenas a granulometria de alimentação, mas também a possível degradação mecânica durante o processo, dimensionando adequadamente os sistemas de separação e recuperação de finos.

4.6 Interação entre os parâmetros operacionais

Os parâmetros operacionais não atuam de forma independente, existe uma complexa rede de interações entre eles, que deve ser considerada para a otimização global do processo. Por exemplo, o efeito da temperatura sobre a taxa de secagem é modulado pela vazão de ar: em temperaturas elevadas, aumentos adicionais de vazão têm efeito limitado se o processo já estiver controlado pela difusão interna (período de taxa decrescente). Da mesma forma, a umidade do ar de entrada afeta a força motriz para evaporação, mas seu efeito é mais pronunciado nas etapas iniciais da secagem do que nas etapas finais.

A modelagem matemática do processo, utilizando o conceito de número de Biot de massa (relação entre a resistência externa e a resistência interna à transferência de massa), tem demonstrado que para o PVC o número de Biot é da ordem de 1,44 (AUBIN et al., 2014). Este valor indica uma competição equilibrada entre as resistências externas (dependem da temperatura, vazão e umidade do ar) e internas (dependem da difusividade da água na matriz porosa do PVC e da espessura da crosta seca). Diferentemente de materiais nos quais a resistência externa é claramente predominante ($Biot \ll 1$) ou a resistência interna é claramente predominante ($Biot \gg 1$), o PVC apresenta uma situação intermediária na qual ambos os mecanismos devem ser considerados para uma otimização eficaz.

5. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS NA QUALIDADE DA RESINA PVC

5.1 Teor de umidade residual

O teor de umidade residual constitui o principal indicador de qualidade da resina PVC após a secagem, sendo diretamente relacionado à sua processabilidade nas etapas de transformação como extrusão, injeção e calandragem. A especificação industrial típica estabelece que a umidade residual deve ser inferior a 0,3% em massa (base úmida), conforme parâmetros de qualidade adotados por produtores nacionais de resina PVC, conforme documentado por Aubin et al. (2014). Dados operacionais de plantas industriais de grande porte, como a unidade chinesa de 10 mil toneladas anuais, reportam valores de umidade final da ordem de 0,26% em peso (WANG et al., 2019), corroborando a viabilidade técnica desta especificação.

A remoção incompleta da água dos poros resulta em uma umidade residual elevada, o que pode causar problemas significativos durante o processamento a montante. Durante a extrusão ou injeção, a água residual vaporiza-se no interior da matriz fundida, gerando bolhas, porosidade e defeitos superficiais no produto final, conforme amplamente documentado na literatura de processamento de polímeros (ODIN MOLD, 2020). Além disso, a umidade residual pode interagir com os aditivos estabilizantes, reduzindo sua eficácia e acelerando a degradação térmica do polímero (ENERGYCLE, 2024).

Diversos fatores operacionais influenciam o teor de umidade residual atingido. O tempo de residência é particularmente crítico porque a remoção da água dos mesoporos é controlada por difusão, um processo inerentemente lento (AUBIN et al., 2014).

Tempos de residência insuficientes resultam em maior umidade residual e distribuição não uniforme de umidade entre as partículas do lote, enquanto tempos adequados permitem que a frente de evaporação avance até o centro da partícula, completando a secagem. A temperatura do leito também exerce influência: temperaturas mais elevadas aceleram o processo difusivo e podem permitir a redução do tempo de residência necessário, mas devem ser cuidadosamente controladas para não exceder o limite de 70 °C, acima do qual ocorre aderência e aglomeração (AUBIN et al., 2014).

A umidade do bolo de entrada afeta diretamente a dificuldade de se alcançar baixos teores de umidade residual. Quando a umidade inicial é elevada, é necessário um tempo de residência mais longo ou temperaturas mais altas para completar a secagem, aumentando o risco de degradação térmica. Por esta razão, sistemas industriais otimizados frequentemente empregam a pré-secagem em estágio pneumático antes do leito fluidizado, removendo a maior parte da água em um equipamento de tempo de residência curto e deixando para o leito fluidizado apenas a remoção da umidade residual dos mesoporos (BANOONI et al., 2018).

5.2 Formação de aglomerados (fisheyes)

Os fisheyes, também conhecidos como "olhos de peixe", são partículas duras e não plastificadas que permanecem como pontos de alta viscosidade no interior da matriz polimérica durante o processamento do PVC. Estes defeitos manifestam-se como pequenas partículas translúcidas ou opacas no produto final, comprometendo sua aparência e, em aplicações críticas como filmes e perfis de alta qualidade, resultando em rejeição do produto (ODIN MOLD, 2020).

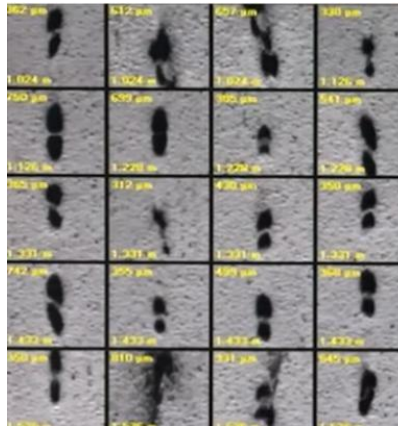
A formação de fisheyes está diretamente relacionada às condições de secagem. Quando a temperatura do leito fluidizado excede 70 °C, a superfície das partículas de PVC torna-se pegajosa, conforme demonstrado experimentalmente por Aubin et al. (2014). Este comportamento adesivo leva à formação de aglomerados de partículas que, uma vez formados, apresentam uma relação área superficial/volume reduzida e oferecem maior resistência à transferência de calor e massa. O interior destes aglomerados pode permanecer úmido mesmo após a secagem superficial, resultando em partículas que não plastificam adequadamente durante a extrusão.

Além da temperatura excessiva, a formação de fisheyes pode ser favorecida por:

- Resinas de baixa porosidade: quando a estrutura porosa da partícula não é suficientemente desenvolvida, a água retida tem maior dificuldade de difundir-se para a superfície, resultando em secagem incompleta do interior da partícula mesmo quando o exterior já se encontra seco (AUBIN et al., 2014).
- Contaminação: a presença de impurezas na alimentação pode atuar como núcleos de aglomeração ou alterar as propriedades superficiais do polímero (BRASKEM, 2015).
- Fluidização inadequada: velocidades de ar insuficientes para manter todas as partículas em suspensão permitem a formação de zonas mortas no leito, onde o material pode permanecer estagnado e aglomerar-se.

A prevenção da formação de fisheyes requer um controle rigoroso da temperatura do leito (mantendo-a abaixo de 70 °C), garantia de condições adequadas de fluidização (velocidade do ar suficiente para suspender as partículas) e, sempre que possível, a utilização de sistemas de dispersão mecânica ou de injeção do bolo úmido diretamente na zona de alta turbulência do leito (AUBIN et al., 2014).

Figura 10: Formação de FISHEYES



Fonte: MANUAL DO MUNDO. Como é fabricado o PVC. Youtube.

5.3 Degradação térmica

O PVC é um polímero termossensível cuja estabilidade térmica é limitada pela presença de ligações C-Cl em sua cadeia molecular. Quando exposto a temperaturas excessivas, o PVC sofre um processo de desidrocloração (degradação térmica) no qual o cloreto de hidrogênio (HCl) é liberado e uma estrutura de polienos conjugados é formada. Esta reação é autocatalítica, ou seja, o HCl liberado acelera a degradação adicional do polímero, resultando em um processo rápido e irreversível (CRUZ et al., 2021).

A temperatura de transição vítrea (T_g) do PVC situa-se entre 82 °C e 87 °C; acima deste ponto, o material torna-se mais flexível, mas o risco de degradação aumenta significativamente (TIRAPID, 2025). A temperatura de decomposição do PVC inicia-se por volta de 100 °C, com degradação acelerada a partir de 130 °C a 135 °C (AUBIN et al., 2014). Estudos de análise termogravimétrica (TG-FTIR) revelaram que a degradação térmica do PVC ocorre em três estágios distintos: o primeiro estágio, na faixa de 200-380 °C, corresponde à descloração e liberação de HCl; o segundo estágio (380-570 °C) envolve o craqueamento da estrutura de polienos e a formação de compostos aromáticos; e o terceiro estágio (acima de 570 °C) corresponde à decomposição de cargas minerais eventualmente presentes na formulação (LI et al., 2010 *apud* CRUZ et al., 2021). Embora as temperaturas de secagem (tipicamente abaixo de 140 °C para o ar e abaixo de 70 °C para o leito) estejam bem abaixo da faixa de degradação intensa, exposições prolongadas ou picos localizados de temperatura podem desencadear o início do processo de descoloração.

As manifestações visíveis da degradação térmica incluem:

- Escurecimento do polímero: inicialmente um tom amarelado, progredindo para marrom e eventualmente preto à medida que a degradação avança (ODIN MOLD, 2020).
- Liberação de HCl: perceptível pelo odor característico e corrosivo, que também ataca os equipamentos metálicos.
- Perda de propriedades mecânicas: o craqueamento das cadeias poliméricas reduz a massa molar média e compromete a resistência mecânica do produto final.

A prevenção da degradação térmica durante a secagem requer o controle de dois fatores: a temperatura máxima atingida pela partícula e o tempo de exposição ao calor (exposição térmica cumulativa). Em secadores de leito fluidizado, a limitação da temperatura do leito a valores inferiores a 70 °C assegura que a superfície da partícula não atinja níveis críticos de degradação (AUBIN et al., 2014). Em secadores pneumáticos, embora as temperaturas do ar sejam mais elevadas (130-190 °C), o tempo de residência extremamente curto (da ordem de segundos) mantém a exposição térmica cumulativa em níveis seguros (DORFESHAN et al., 2020).

Um aspecto frequentemente negligenciado é o resfriamento do produto após a secagem. Se a resina não for adequadamente resfriada antes do ensacamento ou do armazenamento, o calor residual pode continuar atuando sobre o material, promovendo degradação lenta ao longo do tempo (ODIN MOLD, 2020). Sistemas industriais bem projetados incluem uma seção de resfriamento na última câmara do leito fluidizado, onde ar frio é introduzido para reduzir a temperatura do produto a níveis seguros antes da descarga (AUBIN et al., 2014).

5.4 Eficiência energética

A secagem do PVC representa um dos maiores consumos energéticos na produção do polímero. O consumo específico de energia (SEC - *Specific Energy Consumption*) varia tipicamente entre 800 e 1500 kJ por kg de PVC seco, dependendo das condições operacionais e do grau da resina processada, representando cerca de 30% do custo total de produção (AUBIN et al., 2014). Banooni, Hajidavalloo e Dorfeshan (2018) demonstraram que o aumento da temperatura do gás em 50 K reduz o consumo específico de energia em 37,7% a 45%, dependendo da vazão de ar utilizada. Além disso, a utilização de um secador pneumático como pré-secador reduz o consumo específico de energia em cerca de 23,1%.

A recuperação de recursos hídricos e energéticos também contribui significativamente para a eficiência global. Estudos chineses sobre a produção de PVC (WANG et al., 2019) abordam a recuperação da água mãe (água residual da centrifugação), do condensado de vapor e o equilíbrio hídrico, demonstrando que o reuso destes recursos reduz o consumo de vapor e as emissões ambientais.

A recuperação de calor do ar de exaustão é outra estratégia importante. Em sistemas industriais, o ar quente e úmido descarregado do secador contém energia térmica significativa que pode ser recuperada por meio de trocadores de calor para pré-aquecer o ar de entrada, reduzindo a demanda de vapor no sistema (WANG et al.,

2019; ENERGYCLE, 2024). A remoção mecânica de água (centrifugação) é 4 a 6 vezes mais barata que a evaporação térmica por quilograma de água removida (ENERGYCLE, 2024), justificando o investimento em sistemas de centrifugação eficientes para reduzir a carga térmica do secador

6. PROBLEMAS NA SECAGEM

6.1. Alto consumo energético

A secagem é uma operação unitária intensiva em consumo energético, devido à necessidade de fornecimento contínuo de calor para a evaporação da água. O desempenho do processo depende do balanço de energia do sistema, sendo sensível à variação da umidade da alimentação. Flutuações nesse parâmetro podem resultar em aumento significativo do consumo de vapor e de ar aquecido. Segundo estudos sobre secagem de PVC em leito fluidizado, essa etapa pode representar parcela significativa do custo de produção do material devido à elevada demanda energética do processo (HEMATI et al., 2014).

6.2. Complexidade técnica

O controle operacional do secador apresenta elevada complexidade, uma vez que é necessário manter condições adequadas de temperatura para evitar a degradação térmica do PVC, que pode provocar reações de desidrocloração e comprometer a qualidade do produto final. Além disso, variações na carga de alimentação ou na umidade do bolo podem provocar instabilidades na fluidização, resultando em colapso do leito ou arraste excessivo de partículas finas. Estudos de modelagem e simulação de secagem de PVC em leito fluidizado destacam que as variáveis operacionais influenciam diretamente a estabilidade fluidodinâmica e térmica do sistema (SILVA, 2023).

7. PROPOSTAS DE MELHORIA DO PROCESSO DE SECAGEM DO PVC

A etapa de secagem do PVC em leito fluidizado apresenta elevado consumo energético e forte dependência de variáveis operacionais. Com base nos princípios de transferência de calor e massa, bem como em práticas industriais consolidadas, são propostas as seguintes melhorias para otimização do processo.

7.1. Recuperação de calor do ar de exaustão

Uma parcela significativa da energia térmica é perdida junto ao ar úmido de saída do secador. A instalação de trocadores de calor para recuperação dessa energia permite o pré-aquecimento do ar de entrada, reduzindo a demanda de vapor no sistema. Estudos sobre sistemas de secagem pneumática e leito fluidizado para PVC demonstram que estratégias de recuperação e reaproveitamento térmico contribuem significativamente para a redução do consumo energético específico do processo e aumento da eficiência térmica global (DORFESHAN; MEHRZAD; HAJIDAVALLLOO, 2022).

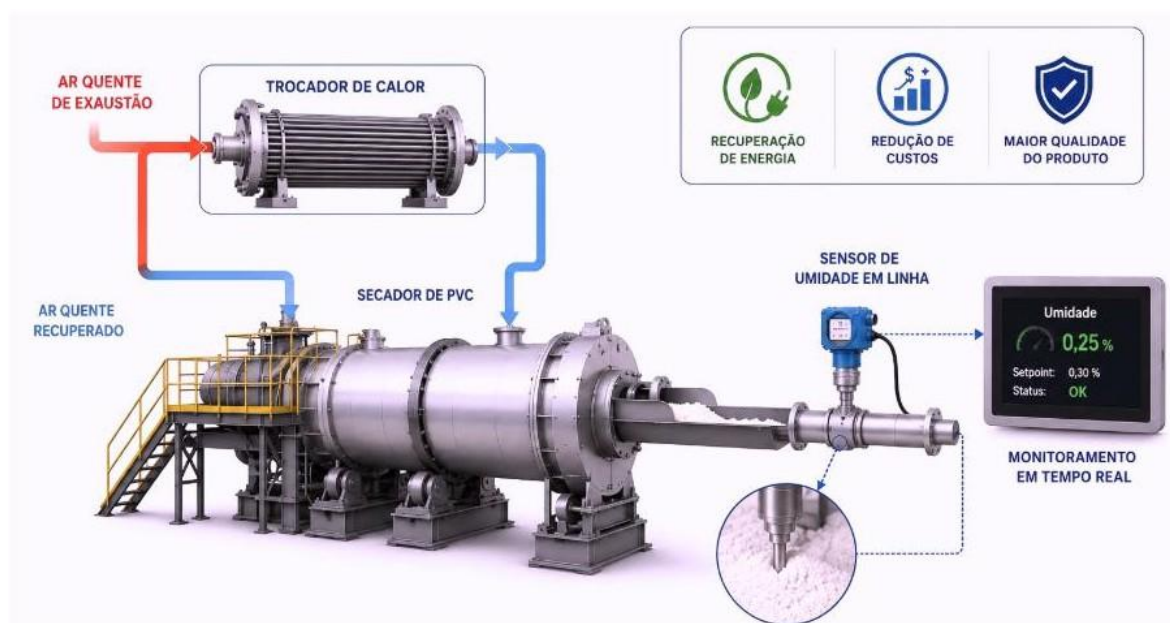
Em sistemas com trocadores de calor existentes, problemas como incrustações e baixa eficiência de troca térmica reduzem o desempenho do sistema. A adoção de programas de manutenção preventiva, bem como a otimização do projeto térmico, pode reduzir significativamente o consumo de vapor.

7.2. Controle da umidade da alimentação

A umidade do bolo de PVC alimentado ao secador é um dos principais fatores que influenciam o balanço de energia do processo. Variações nessa variável resultam em instabilidades operacionais e aumento do consumo energético.

A implementação de sensores de umidade em linha, associados a sistemas de controle automático da alimentação, permite maior estabilidade operacional, redução de desperdícios energéticos e maior uniformidade do produto final. Estudos de modelagem e simulação da secagem de PVC em leito fluidizado demonstram que a umidade inicial do material influencia diretamente a cinética de secagem, o consumo energético e a estabilidade operacional do processo (HEMATI et al., 2014).

Figura 11: Esquema para propostas de melhoria.



Fonte: Autores, 2026.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A secagem do policloreto de vinila (PVC) em leito fluidizado constitui uma etapa fundamental no processo produtivo, exercendo influência direta tanto na qualidade do produto final quanto no consumo energético global da planta. Ao longo deste trabalho, foi possível evidenciar que se trata de uma operação unitária complexa, na qual fenômenos de transferência de calor e massa ocorrem de forma acoplada e são fortemente influenciados pelas características do material e pelas condições operacionais.

A análise dos parâmetros operacionais demonstrou que a temperatura do ar de secagem, a vazão de ar, a umidade da alimentação, o tempo de residência e a granulometria da resina são variáveis críticas para o desempenho do processo. O controle inadequado desses parâmetros pode resultar em problemas como degradação térmica do polímero, formação de aglomerados, instabilidades na fluidização e aumento do consumo energético, comprometendo tanto a eficiência do processo quanto a qualidade da resina produzida.

Observou-se que a temperatura é o parâmetro mais sensível, exigindo um equilíbrio entre a maximização da taxa de secagem e a preservação da integridade térmica do PVC. Da mesma forma, a vazão de ar deve ser cuidadosamente ajustada para garantir a fluidização adequada do leito sem provocar arraste excessivo de partículas finas. A umidade do bolo de alimentação mostrou-se determinante no balanço de energia do sistema, sendo um fator diretamente relacionado à demanda térmica do processo.

Além disso, verificou-se que a distribuição granulométrica da resina desempenha papel relevante na dinâmica do leito fluidizado, influenciando a eficiência da secagem e a estabilidade operacional. Partículas muito finas aumentam a área de transferência, porém elevam o risco de perdas por arraste, enquanto partículas maiores podem dificultar a remoção da umidade interna.

Com base na literatura analisada, foram propostas estratégias de otimização, como a recuperação de calor do ar de exaustão, o controle da umidade da alimentação, a melhoria da eficiência dos trocadores de calor e o ajuste das condições de operação do leito fluidizado. Tais medidas demonstram potencial para reduzir significativamente o consumo energético, aumentar a produtividade e garantir maior estabilidade operacional do sistema.

Por fim, conclui-se que a otimização do processo de secagem do PVC depende de uma abordagem integrada, que considere simultaneamente aspectos térmicos, fluidodinâmicos e estruturais do material. A aplicação dos conceitos de engenharia de processos, aliada ao controle rigoroso das variáveis operacionais, é essencial para alcançar maior eficiência e competitividade industrial. Como perspectiva futura, recomenda-se o desenvolvimento de estudos experimentais e modelagens matemáticas mais detalhadas, que permitam prever o comportamento do sistema e orientar a tomada de decisão em ambientes industriais.

REFERÊNCIAS

- 6WRESEARCH. **Brazil recycled thermoplastics market (2025-2031): trends, outlook & forecast.** 6Wresearch, 2025.
- ARAÚJO, A. C. B. de; VASCONCELOS, L. G. S.; ALVES, J. J. N.; SHANG, H. **Optimal operation of an industrial PVC dryer.** *Drying Technology*, v. 32, n. 14, p. 1-17, 2014.
- AUBIN, A.; ANSART, R.; HEMATI, M.; LASYUE, T.; BRANLY, M. **Modeling and simulation of drying operations in PVC powder production line: Experimental and theoretical study of drying kinetics on particle scale.** *Powder Technology*, v. 255, p. 120-133, 2014.
- BAEYENS, J.; VAN GAUWBERGEN, D.; VINCKIER, I. **Pneumatic drying: the use of large-scale experimental data in a design procedure.** *Powder Technology*, v. 83, n. 2, p. 139-148, 1995.
- BANOONI, S.; HAJIDAVALLOO, E.; DORFESHAN, M. **Experimental and numerical study of the effects of pre-drying of S-PVC using a pneumatic dryer.** *Powder Technology*, v. 338, p. 220-232, 2018.
- BORDE, I.; LEVY, A. **Pneumatic and flash drying.** In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). *Handbook of Industrial Drying*. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- BRASKEM. **PVC: da matéria-prima à aplicação.** São Paulo: Braskem, 2015.
- CALLISTER JR., William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CRUZ, P. P. R.; SILVA, L. C.; FIUZA-JR, R. A.; POLLI, H. **Thermal dehydrochlorination of pure PVC polymer: Part I—thermal degradation kinetics by thermogravimetric analysis.** *Journal of Applied Polymer Science*, v. 138, n. 25, 2021.
- DENGTAI, P. **Device for drying PVC materials.** Patente CN203586714U, 2013.
- DORFESHAN, M.; MEHRZAD, S.; HAJIDAVALLOO, E. **Experimental and numerical investigation of specific energy consumption of the two-stage pneumatic-fluidized bed drying of suspension-grade polyvinyl chloride.** *Drying Technology*, v. 40, n. 2, p. 371-386, 2022.
- EDO, M. et al. **A review on the chemistry of polyvinyl chloride (PVC).** *Polymers*, v. 16, n. 2, 2024.
- ENERGYCLE. **Sistema de Secagem de Plástico: Design e Seleção da Linha de Reciclagem.** 2024.
- GEA. **Contact Fluidizer Fluid Bed for Bulk Chemicals Drying.** 2024.

GRAUER, P. D. et al. **Convective drying of vinyl chloride polymer**. Patente DE4039235A1, 1992.

KERR, W. L. **Food Processing Operating Systems and Machinery Design**. 2023.

KOWALSKI, S. **Drying of Porous Materials**. New York: Springer, 2007.

LEVY, A.; BORDE, I. **Steady state one dimensional flow model for a pneumatic dryer**. Chemical Engineering and Processing, 1999.

MEZHERICHER, M.; LEVY, A.; BORDE, I. **Three-dimensional modelling of pneumatic drying process**. Powder Technology, 2010.

MUJUMDAR, A. S. **Albright's Chemical Engineering Handbook**. CRC Press, 2009.

MUJUMDAR, A. S.; LAW, C. L. **Fluidized bed dryers**. Handbook of Industrial Drying, 2015.

NUNES, L. R. **PVC 2006: do cloreto de vinila à resina – tecnologia, mercado e perspectivas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Sprint, 2006.

ODIN MOLD. **Secagem de matérias-primas plásticas: quais são os métodos de processamento mais eficientes?** 2020.

PERAZZINI, H. **Secagem de sólidos porosos granulares**. Tese (Doutorado) – UFSCar, 2014.

PVC RESIN CHARACTERIZATIONS. **China Jinsheng Plastic**. 2021.

RANGWALA, S. et al. **Ionic liquid catalysis for chemical recycling of mixed plastic waste**. Nature Sustainability, 2026.

ROLLE PAAL. **PVC pipe design life and long-term pressure resistance**. 2025.

SHUGUANG, W. et al. **Production method of chlorinated polyvinyl chloride resin**. Patente CN109384862A, 2019.

SILVA, J. A. **Modelagem, simulação e avaliação de estratégias de controle na secagem de resina de PVC em leito fluidizado**. Dissertação (Mestrado) – UFAL, 2023.

SOARES, E. A. **Poli(cloreto de vinila) (PVC)**. Revista Plástico Industrial, 2020.

SOLVIN. **Módulo V: PVC Solids Drying**. Material de treinamento técnico, 2005.

SOLVIN. **PVC-S: Essorage, Secagem, Morfologia**. Material de treinamento técnico, 2005.

SUHERMAN, S.; PEGLOW, M.; TSOTSAS, E. **Measurement and modeling of drying kinetics of PVC powder**. Advanced Science Letters, 2017.

SZÉKELY, J.; EVANS, J. W.; SOHN, H. Y. **Gas-Solid Reactions**. New York: Academic Press, 1976.

TIRAPID. **Análise aprofundada do ponto de fusão do PVC: principais temperaturas e fatores de influência**. 2025.

WANG, H. W. et al. **PVC离心干燥能源与水资源综合利用**. Polyvinyl Chloride, 2019.

WANG, W.; CHEN, G.; MUJUMDAR, A. S. **Physical interpretation of solids drying: An overview on mathematical modeling research**. Drying Technology, 2007.

XU, P.; SASMITO, A. P.; MUJUMDAR, A. S. (Ed.). **Heat and Mass Transfer in Drying of Porous Media**. Boca Raton: CRC Press, 2020.

YANG, L. et al. **Global polyvinyl chloride market analysis and future trends**. Resources, Conservation and Recycling, 2024.

YAO ZUN. **浅谈流化床干燥器**. China Chemical News, 2021.

YEUEXIAN, L. et al. **Drying system and method for polyvinyl chloride**. Patente CN107218781A, 2017.

YING, Z.; YONGGANG, T.; CHONGLEI, W. **Drying method and system for paste polyvinyl chloride recycled material**. Patente CN105333706A, 2016.

ZAIONCZ, S. **PVC: da matéria-prima à aplicação**. São Paulo: Braskem, 2006.

ZHANG, Y. et al. **Chemical upcycling of mixed PVC and polyolefins to hydrocarbons and hydrochloric acid using ionic liquid catalysis**. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2025