Dióxido de Titânio
Uma partícula sem substituto à altura há mais de um século

Da fabricação à construção de um desempenho óptico único

"Nenhum outro pigmento branco de uso industrial reúne, com a mesma eficiência, índice de refração, espalhamento da luz, poder de cobertura, força de tingimento e possibilidade de engenharia superficial."

Paulo Cezar Maziero Tiano
Químico e consultor técnico da TIANOTECH
São Paulo | Setembro de 2026

Resumo

O dióxido de titânio é o principal pigmento branco da indústria de revestimentos porque combina propriedades que outros materiais apresentam apenas de forma parcial. Seu elevado índice de refração permite forte espalhamento da luz visível; sua estrutura cristalina pode ser controlada; o tamanho e a distribuição das partículas podem ser ajustados à faixa de maior eficiência óptica; e sua superfície pode receber tratamentos que modificam dispersabilidade, durabilidade, brilho e estabilidade. Este Paper acompanha essa construção em três etapas: fabricação, propriedades ópticas e tratamento superficial. A comparação entre rutilo e anatase mostra por que a forma cristalina interfere no desempenho e na aplicação. A análise também evidencia que a composição química TiO_2, isoladamente, não explica o resultado final. O desempenho nasce da integração entre pureza, fase cristalina, tamanho de partícula, distribuição granulométrica e engenharia de superfície.

Palavras-chave dióxido de titânio; rutilo; anatase; índice de refração; espalhamento da luz; poder de cobertura; tratamento superficial; pigmentos brancos.

Nota de escopo

Este Paper se restringe a três temas: processo de fabricação, propriedades ópticas e tratamento superficial. Dispersão industrial, formulação completa, cargas minerais, concentração volumétrica de pigmentos, controle de qualidade e análise econômica aparecem apenas quando são indispensáveis para explicar os três temas centrais. Cada um desses assuntos poderá receber tratamento próprio em trabalhos posteriores.

1 A afirmação que orienta o Paper

Ao longo deste Paper, demonstraremos por que o dióxido de titânio ocupa uma posição única entre os pigmentos brancos de uso industrial. A afirmação não depende de uma propriedade isolada. Ela resulta de uma combinação: índice de refração muito elevado, forte espalhamento da luz visível, grande poder de cobertura, alta força de tingimento, controle da forma cristalina e uma superfície que pode ser modificada conforme a aplicação.

Outros sólidos podem ser brancos, podem aumentar o volume de uma tinta ou podem contribuir para determinadas propriedades. Nenhum deles, porém, reúne a mesma eficiência óptica do TiO_2 pigmentário. A comparação do índice de refração é o primeiro indício. A explicação completa exige acompanhar a partícula desde a rota de fabricação até o tratamento final da superfície.

A palavra único será usada, portanto, em um sentido técnico e delimitado. Ela descreve a combinação de propriedades do dióxido de titânio como pigmento branco industrial. Não significa que todas as suas grades sejam iguais nem que uma única grade seja ideal para qualquer sistema. A existência de numerosas grades comerciais confirma justamente o contrário: o núcleo de TiO_2 oferece uma capacidade óptica extraordinária, mas a partícula precisa ser construída para cumprir uma função específica.

2 Mais de um século como referência de brancura

O uso industrial do dióxido de titânio como pigmento branco começou nas primeiras décadas do século XX. O documento técnico produzido por Paulo Tiano em 2010 registra sua introdução na indústria de tintas por volta de 1920 [1]. A literatura técnica da DuPont informa que o processo sulfato foi comercializado em 1931 para produzir anatase e, a partir de 1941, também rutilo [2]. Esses marcos se referem a etapas diferentes da evolução industrial e explicam por que datas distintas aparecem em materiais históricos.

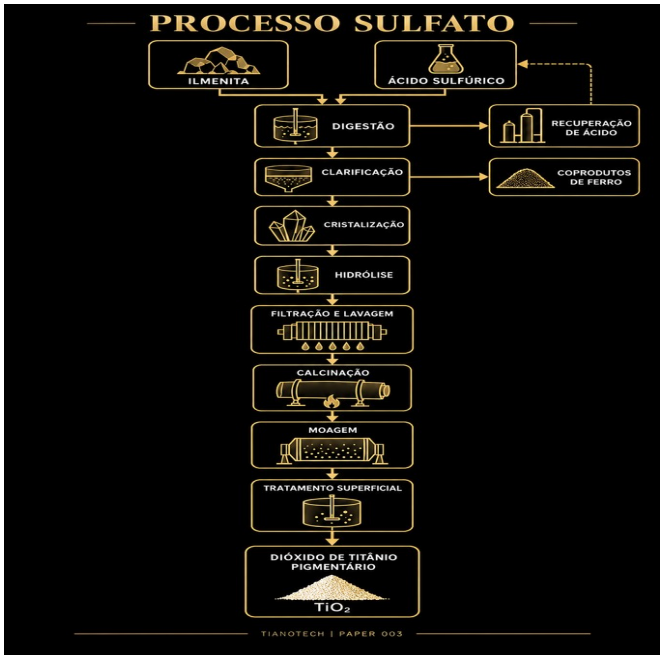
O que permaneceu constante foi a função central do TiO_2: controlar a interação entre a luz e o filme. Ao longo de mais de um século, processos, pureza, tratamentos e grades foram aperfeiçoados, mas nenhum substituto assumiu a mesma posição nas tintas, plásticos, papéis e

outras aplicações que dependem de brancura e opacidade. A longevidade não decorre apenas de tradição industrial. Ela decorre de uma vantagem física mensurável [5,6,16].

3 A fabricação constrói a partícula

O pigmento final não é simplesmente um minério moído. A fabricação converte matérias-primas minerais em TiO_2 purificado, controla a fase cristalina, forma cristais de dimensão pigmentária, reduz aglomerados e modifica a superfície. Os dois processos industriais clássicos, sulfato e cloreto, seguem rotas químicas diferentes até o TiO_2 intermediário. A partir daí, ambos exigem operações de acabamento para que o material alcance desempenho óptico e aplicação industrial [5-8,16].

3.1 Processo sulfato



O processo sulfato utiliza matérias-primas como a ilmenita e ácido sulfúrico. A digestão produz uma solução de sulfatos de titânio e de outros metais. Etapas de redução, purificação, hidrólise, lavagem e calcinação levam ao TiO_2 intermediário. A nucleação e as condições de calcinação controlam a formação de anatase ou rutilo [1,2,5-8,16].

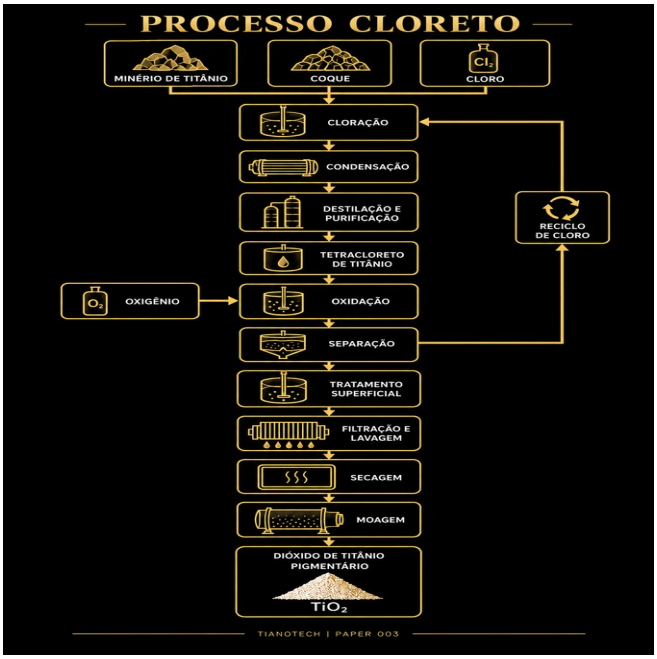
De forma simplificada, a sequência inclui a digestão do minério, a separação de impurezas, a hidrólise do sulfato de titanila e a calcinação do precipitado hidratado. O processo tolera diferentes matérias-primas, mas gera correntes de sulfato de ferro e ácido diluído que precisam ser recuperadas, reutilizadas ou tratadas. A Figura 1 organiza a rota principal e seus circuitos auxiliares. A avaliação ambiental deve considerar a tecnologia

instalada, a recuperação de reagentes e a destinação dos coprodutos, e não apenas o nome da rota [5-8].

Figura 1 — Processo sulfato de fabricação do dióxido de titânio

Fonte: adaptação gráfica TIANOTECH (2026), baseada em material técnico industrial fornecido pelo autor [1].

3.2 Processo cloreto



O processo cloreto reage matéria-prima rica em titânio com cloro e carbono em alta temperatura, formando tetracloreto de titânio. O $TiCl_4$ é purificado por destilação e oxidado para gerar TiO_2 pigmentário. O cloro liberado retorna ao processo. A oxidação em fase vapor permite controle estreito da distribuição de tamanho e da forma cristalina, o que favorece brilho, cobertura e força de tingimento [2,5-8,16].

A rota é frequentemente descrita como mais limpa por recircular o cloro e gerar menor volume de determinados resíduos. Essa comparação exige cautela. Consumo energético, qualidade do minério, controle de emissões e tratamento das correntes residuais continuam relevantes. Em termos de produto, a principal vantagem é o controle do TiO_2 intermediário antes do acabamento superficial. A Figura 2 evidencia a purificação do $TiCl_4$, sua oxidação e o reciclo de cloro [7,8].

Figura 2 — Processo cloreto de fabricação do dióxido de titânio

Fonte: adaptação gráfica TIANOTECH (2026), baseada em material técnico industrial fornecido pelo autor [1].

3.3 A divergência sobre anatase no processo cloreto

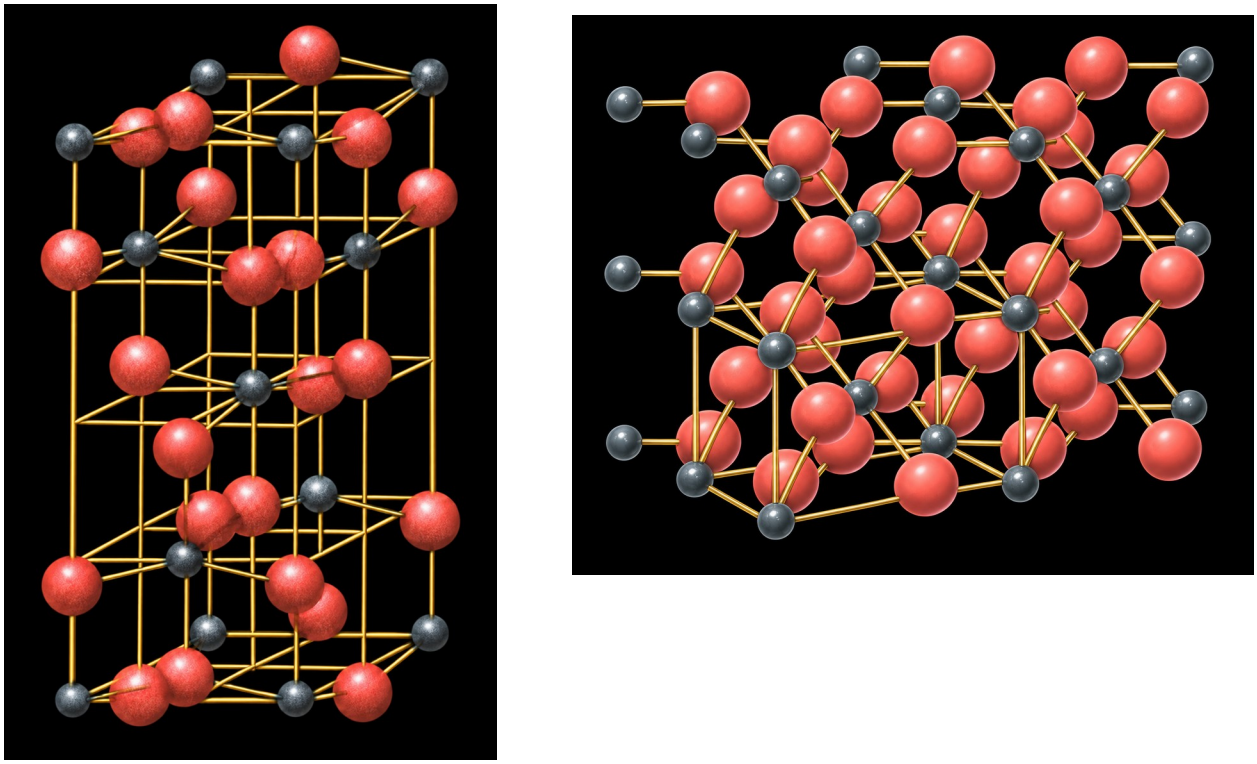
O documento de 2010 afirma que o processo cloreto produz exclusivamente rutilo, formulação que corresponde à prática industrial predominante e aparece com frequência em textos técnicos [1]. A apostila da DuPont faz uma distinção importante: o processo cloreto foi comercializado inicialmente para produzir apenas rutilo, mas a empresa informa fabricação de anatase por essa rota desde 1975 [2].

A conclusão correta separa possibilidade técnica de predominância comercial. As duas rotas podem produzir anatase ou rutilo quando o processo é projetado e controlado para isso. Na prática, o cloreto está fortemente associado ao rutilo pigmentário, enquanto o sulfato conserva ampla flexibilidade para ambas as formas. Essa distinção evita transformar uma tendência industrial em impossibilidade química [2,5,16].

Aspecto	Processo sulfato	Processo cloreto
Matéria prima	Ilmenita e outras fontes tratáveis com ácido	Rutilo natural ou matérias primas enriquecidas
Intermediário químico	Sulfato de titanila em solução	Tetracloreto de titânio purificado
Etapa decisiva	Hidrólise seguida de calcinação	Oxidação do $TiCl_4$ em fase vapor
Formas cristalinas	Anatase e rutilo	Predominantemente rutilo; anatase é tecnicamente possível
Controle da partícula	Nucleação e calcinação	Oxidação e condições de crescimento
Questão ambiental	Ácidos e sais exigem recuperação ou tratamento	Cloro é recirculado; energia e emissões continuam relevantes
Acabamento	Moagem úmida e tratamento superficial	Moagem úmida e tratamento superficial

4 Rutilo e anatase na prática

Rutilo e anatase têm a mesma composição química nominal, TiO_2, mas seus átomos estão organizados de maneira diferente. Nas duas estruturas, o titânio se coordena com oxigênio em unidades octaédricas. A forma como esses octaedros se conectam altera densidade, compactação, índice de refração e estabilidade fotoquímica. As Figuras 3 e 4 tornam visível essa diferença de organização. A estrutura do rutilo é mais compacta, e essa diferença estrutural aparece diretamente no desempenho [5,6,9].



Figuras 3 e 4 — Estruturas cristalinas do anatásio e do rutilo

Fonte: adaptação gráfica TIANOTECH (2026), com base no material técnico fornecido pelo autor. Cores: Ti em cinza-grafite; O em vermelho-coral.

O índice de refração do rutilo é aproximadamente 2,73, enquanto o anatase fica próximo de 2,55 ou 2,56 [1,2]. A diferença parece pequena quando observada apenas como número, mas é decisiva porque o espalhamento depende do contraste entre o índice do pigmento e o índice do meio. Resinas usadas em tintas costumam apresentar índices na faixa aproximada de 1,47 a 1,55. O contraste é, portanto, muito maior para o TiO_2 do que para cargas e pigmentos brancos alternativos [5,6,16].

Propriedade	Rutilo	Anatase	Consequência prática
Índice de refração	Aproximadamente 2,73	Aproximadamente 2,55	O rutilo oferece maior eficiência de espalhamento
Densidade	Aproximadamente 4,26	Aproximadamente 3,84	A mesma massa corresponde a volumes diferentes
Estrutura	Mais compacta	Menos compacta	Afeta estabilidade e resposta óptica
Poder de cobertura por massa	Cerca de 30 por cento maior em referência clássica	Inferior ao rutilo	Favorece o rutilo em revestimentos de alto desempenho
Estabilidade fotoquímica	Maior	Menor	Rutilo é preferido quando durabilidade e retenção são críticas
Aplicação típica	Tintas exteriores, automotivas e industriais	Interiores e aplicações específicas	A escolha depende do desempenho requerido

A escolha prática não deve transformar o anatase em um material inferior em qualquer situação. Ele pode ser adequado quando a aplicação não exige elevada resistência ao intemperismo ou quando seu comportamento específico é desejado. O rutilo domina os revestimentos de maior exigência porque combina eficiência óptica e estabilidade. O tratamento superficial amplia essa diferença e permite ajustar a partícula a usos muito distintos [5,6,9,16].

5 Como o desempenho óptico é construído

5.1 Espalhamento da luz e índice de refração

Um filme branco esconde o substrato principalmente porque espalha a luz em muitas direções. Quando a luz encontra uma partícula de índice de refração elevado dispersa em um meio de índice menor, sua direção muda. Refração e difração aumentam o caminho óptico e devolvem grande parte da radiação à superfície, como sintetiza a Figura 5. Se o filme contém partículas suficientes, pouca luz alcança o fundo e a película parece branca, brilhante e opaca [2,5,6,10,11,16].

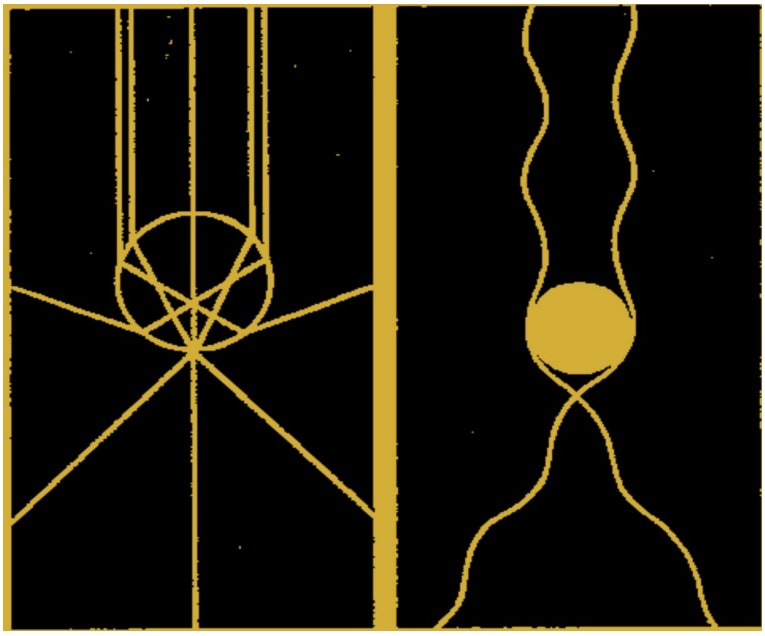


Figura 5 — Refração e difração da luz em partículas pigmentárias

Fonte: adaptação gráfica TIANOTECH (2026), baseada no material técnico consultado [2].

O TiO_2 se destaca porque cria um contraste de índice muito maior do que materiais como carbonato de cálcio, argila, barita, litopônio ou óxido de zinco. Esses materiais podem cumprir funções importantes na formulação, mas não substituem a contribuição óptica do TiO_2 na mesma concentração e espessura de

filme. A Figura 6 mostra por que esse contraste prolonga o caminho óptico e favorece o retorno da luz ao observador [5,6,10,16].

Figura 6 — Caminho da luz em filmes de tinta branca

Fonte: adaptação gráfica TIANOTECH (2026), baseada no material técnico consultado [2].

Material	Índice de refração aproximado
Carbonato de cálcio	1,63
Barita	1,64
Argila	1,65
Litopônio	1,84
Óxido de zinco	2,02
TiO_2 anatase	2,55
TiO_2 rutilo	2,73

A comparação visual da Figura 7 demonstra a consequência prática desses números. Mantida a mesma concentração volumétrica de pigmento e o mesmo ligante, o aumento do índice de refração eleva drasticamente a capacidade de ocultar o padrão do fundo. O rutilo, com índice próximo de 2,73, apresenta a maior opacidade entre os materiais comparados [5,11,16,17].

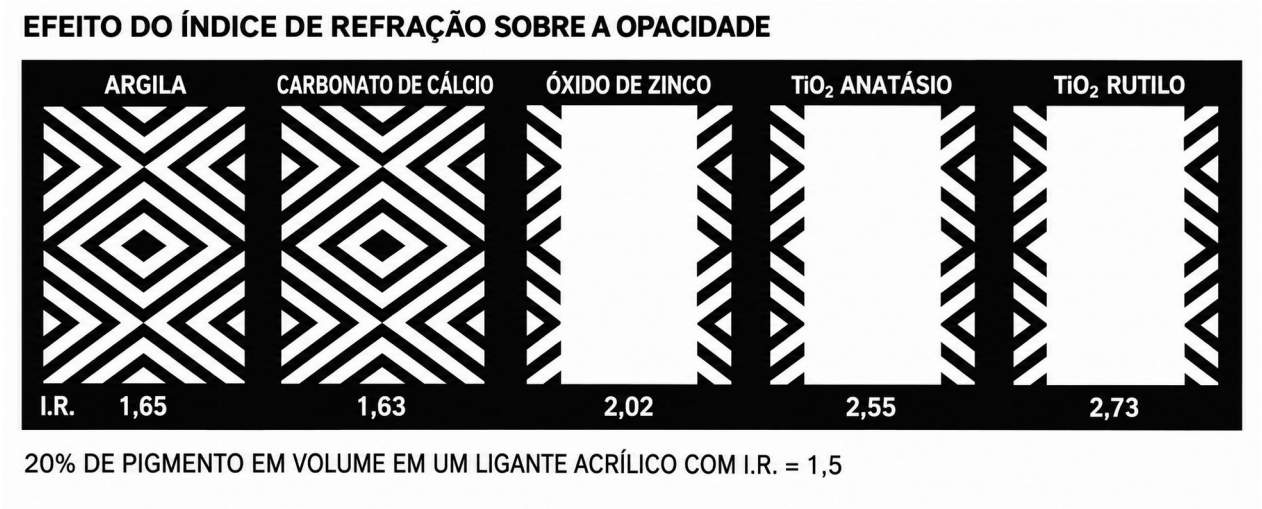


Figura 7 — Efeito do índice de refração sobre a opacidade

Fonte: adaptação e tradução TIANOTECH (2026), baseada no material técnico consultado [2].

5.2 Tamanho e distribuição das partículas

Índice elevado não basta. A eficiência também depende do tamanho da partícula em relação ao comprimento de onda da luz. Para espalhar de modo eficiente a região visível, os pigmentos comerciais são produzidos com dimensão média próxima de 0,2 a 0,3 micrômetro. A referência da DuPont mostra que o espalhamento total se aproxima do máximo por volta de 0,2 micrômetro e que mudanças de tamanho alteram de maneira diferente as componentes azul, verde e vermelha [2,5,6,10,16].

Partículas muito pequenas deixam de aproveitar plenamente o espalhamento da luz visível e podem acentuar o subtom azulado em sistemas que também contêm material absorvente. Partículas maiores perdem eficiência e podem comprometer brilho e acabamento. Por isso, a distribuição granulométrica importa tanto quanto o valor médio. Uma distribuição estreita reduz a presença simultânea de partículas finas demais e grossas demais [5,6,16].

5.3 Distância entre partículas

As partículas precisam permanecer suficientemente separadas para trabalhar de forma eficiente. Quando a concentração aumenta e a distância entre partículas diminui, ocorre crowding, ou aglomeração óptica. Os campos de espalhamento deixam de agir de maneira independente e a eficiência por unidade de TiO_2 cai. Em determinada faixa, adicionar mais pigmento aumenta a opacidade total, mas produz ganhos cada vez menores. Acima de certo ponto, o acréscimo pode elevar custo sem entregar cobertura proporcional [12,16].

Esse fenômeno conecta uma propriedade microscópica a uma decisão de formulação. A quantidade de TiO_2 não deve ser avaliada sozinha. É preciso observar tamanho, distribuição, grau de separação, espessura do filme, índice do veículo e presença de extensores. Um pigmento bem escolhido, porém mal distribuído, não entrega o desempenho previsto por sua ficha técnica [12,13,16].

5.4 Cobertura força de tingimento cor e brilho

Poder de cobertura é a capacidade de ocultar um fundo de contraste. Força de tingimento mede a contribuição do TiO_2 ao competir com a absorção de um pigmento colorido. As duas propriedades dependem do espalhamento, mas podem responder de maneira diferente quando ocorre floculação. Por isso, uma avaliação de força de tingimento deve ser acompanhada por teste de uniformidade sob cisalhamento, como o rub-out, para verificar se o resultado não foi distorcido pela formação de flóculos [1,2,5,6,11,16,17].

O subtom decorre da distribuição espectral do espalhamento. Alterar o tamanho de partícula muda a relação entre as componentes azul e vermelha, sobretudo em sistemas que contêm matéria absorvente. O brilho, por sua vez, depende da regularidade da superfície do filme e do estado de dispersão. Aglomerados e partículas grossas aumentam a rugosidade, reduzem reflexão especular e tornam o acabamento menos uniforme [5,6,16].

6 O tratamento superficial completa a partícula

Depois da formação do núcleo cristalino, a superfície do TiO_2 ainda precisa ser ajustada. A partícula nua pode apresentar atividade fotoquímica, interação inadequada com o veículo, tendência à floculação ou baixa compatibilidade com o sistema. O tratamento superficial cria uma interface entre o núcleo inorgânico e o meio onde o pigmento será usado [5,6,9,14-16].

6.1 Tratamentos inorgânicos

Os tratamentos inorgânicos mais comuns utilizam óxidos hidratados de alumínio e silício, além de compostos de zircônio, zinco ou fosfatos em determinadas tecnologias [1,2]. A alumina favorece molhamento, dispersabilidade e estabilidade coloidal. A sílica pode formar uma barreira mais densa ao redor do núcleo, reduzindo o contato entre a superfície fotoativa e o meio e aumentando resistência ao intemperismo e à perda de brilho [5,6,14,15].

O revestimento também pode atuar como espaçador físico. Em sistemas de alta concentração, uma camada controlada ajuda a manter distância entre núcleos de TiO_2 e reduz perdas por crowding. Assim, uma grade com teor nominal de TiO_2 menor pode apresentar maior eficiência de cobertura em determinada formulação do que outra grade com teor mais alto. O valor de uso depende da arquitetura da partícula, não apenas da análise química [5,6,12,16].

6.2 Tratamentos orgânicos

Tratamentos orgânicos são aplicados em pequenas quantidades para modificar energia superficial, umectação, compatibilidade e fluxo. Polióis, silicones e outros agentes podem facilitar a incorporação em sistemas aquosos ou orgânicos, reduzir a umidade adsorvida e melhorar o manuseio. Sua escolha depende do veículo e do processo. Um tratamento eficaz em uma resina pode não produzir o mesmo resultado em outra [5,6,13,16].

6.3 O equilíbrio entre durabilidade e dispersabilidade

A engenharia superficial envolve trade-offs. Revestimentos densos de sílica elevam a proteção contra atividade fotoquímica e melhoram durabilidade, mas podem tornar a grade mais exigente durante o molhamento e a dispersão. Tratamentos com alumina e componentes orgânicos podem recuperar facilidade de incorporação e estabilidade. A relação entre esses componentes é ajustada conforme o objetivo da grade [5,6,14-16].

Esse equilíbrio aparece com clareza em pigmentos destinados a exteriores. A proteção necessária para reter brilho e cor pode exigir maior trabalho de dispersão do que uma grade voltada a interiores. Não existe tratamento máximo para todas as propriedades. Existe uma combinação coerente com o sistema, o processo e o desempenho esperado [5,6,14-16].

Função	Contribuição predominante do tratamento
Durabilidade exterior	Barreira à atividade fotoquímica e menor contato do núcleo com o veículo
Dispersabilidade	Ajuste da energia superficial e melhor molhamento
Estabilidade coloidal	Redução da aproximação e da reaglomeração das partículas
Eficiência óptica	Separação entre núcleos e menor perda por crowding
Brilho	Menos aglomerados e superfície de filme mais regular
Resistência química e térmica	Proteção inorgânica adequada à aplicação

7 Da fabricação ao desempenho

A trajetória completa da partícula pode ser lida como uma cadeia de decisões. A matéria-prima e a rota definem as condições de purificação. A nucleação, a oxidação ou a calcinação controlam fase cristalina e crescimento. A moagem reduz aglomerados e ajusta a distribuição. O tratamento inorgânico protege e espaça. O tratamento orgânico adapta a interface. Somente depois dessa sequência o pigmento está pronto para revelar seu potencial em uma formulação [5,6,16].

Essa cadeia explica por que dois produtos com a mesma descrição química podem apresentar comportamentos diferentes. Ambos são TiO_2, mas podem divergir em fase cristalina, tamanho médio, largura da distribuição, área superficial, tipo e quantidade de tratamento e compatibilidade com o veículo. Escolher uma grade apenas pelo teor de TiO_2 ou pelo preço por quilograma ignora os mecanismos que determinam cobertura, rendimento, estabilidade e durabilidade [5,6,16].

Também explica por que o desempenho óptico é construído. A química fornece um núcleo de índice elevado. A engenharia industrial converte essa possibilidade em partícula pigmentária. O tratamento superficial protege e direciona a interação com o sistema. A formulação e o processo precisam, então, preservar o que foi construído [5,6,10,12,16].

O TIO_2 NÃO CHEGA PRONTO À FORMULAÇÃO
ELE CHEGA CONSTRUÍDO PARA UMA FUNÇÃO

8 Conclusão

O dióxido de titânio permanece sem substituto à altura porque nenhuma alternativa industrial reúne a mesma combinação de índice de refração, eficiência de espalhamento, poder de cobertura, força de tingimento, controle cristalino e engenharia superficial. O rutilo ocupa a posição de maior desempenho óptico e durabilidade; o anatase conserva aplicações próprias e demonstra que a estrutura cristalina altera profundamente o comportamento de uma mesma composição química [5,6,9,16].

Os processos sulfato e cloreto não produzem apenas TiO_2. Eles constroem pureza, fase e distribuição de partículas. O acabamento superficial completa o projeto, equilibrando dispersabilidade, estabilidade, brilho e resistência ao intemperismo. Por isso, o desempenho de uma grade não pode ser deduzido somente pelo teor de TiO_2 [5,6,14-16].

A conclusão técnica é simples: a singularidade do dióxido de titânio está na integração. O índice de refração cria o potencial. O tamanho e a separação transformam esse potencial em espalhamento. A forma cristalina define estabilidade. A superfície adapta a partícula à aplicação. É essa arquitetura que sustenta mais de um século de liderança como pigmento branco [5,6,10,12,16].

9 Cenas dos próximos capítulos

Este Paper termina, mas o dióxido de titânio está longe de terminar aqui. Quando essa partícula entra em uma formulação ou em uma aplicação real, surgem novas perguntas. Como molhá-la e dispersá-la corretamente? Como transformar seu potencial óptico em opacidade efetiva? Como equilibrar desempenho e custo? O que muda nas tintas de emulsão, nos papéis laminados e nas partículas ultrafinas? E por que o TiO_2 pode se tornar fotocataliticamente ativo?

Esses serão alguns dos próximos capítulos da Coleção Técnica TIANOTECH sobre Dióxido de Titânio.

Referências

[1] TIANO, Paulo Cezar Maziero. Dióxido de Titânio. Documento técnico autoral. São Paulo, 2010.

[2] DUPONT. Ti Pure Titanium Dioxide for Coatings. White Pigments and Mineral Products. Material técnico, edição consultada de 1995, páginas 1 a 21.

[3] CHEMOURS. Titanium Dioxide for Coatings. Guia técnico Ti Pure. Seções sobre teoria óptica e fabricação consultadas como referência complementar para terminologia e processo.

[4] ASTM INTERNATIONAL. ASTM D476-15(2021). Standard Classification for Dry Pigmentary Titanium Dioxide Products. West Conshohocken: ASTM International, 2021.

[5] BRAUN, J. H.; BAIDINS, A.; MARGANSKI, R. E. TiO_2 pigment technology: a review. Progress in Organic Coatings, v. 20, n. 2, p. 105-138, 1992. DOI: 10.1016/0033-0655(92)80001-D.

[6] BUXBAUM, G.; PFAFF, G. (ed.). Industrial Inorganic Pigments. 3. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2005. DOI: 10.1002/3527603735.

[7] UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Titanium - Minerals Yearbook 2022. Reston: U.S. Geological Survey, 2025.

[8] EUROPEAN COMMISSION. Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Large Volume Inorganic Chemicals - Solids and Others Industry. Luxembourg: European Commission, 2007. Seção sobre dióxido de titânio.

[9] DIEBOLD, U. The surface science of titanium dioxide. Surface Science Reports, v. 48, n. 5-8, p. 53-229, 2003. DOI: 10.1016/S0167-5729(02)00100-0.

[10] MIE, G. Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. Annalen der Physik, v. 330, n. 3, p. 377-445, 1908. DOI: 10.1002/andp.19083300302.

[11] ISO. ISO 6504-1:2019. Paints and varnishes - Determination of hiding power - Part 1: Kubelka-Munk method for white and light-coloured paints. Geneva: International Organization for Standardization, 2019.

[12] AUGER, J.-C.; MARTINEZ, V. A.; STOUT, B. Theoretical study of the scattering efficiency of rutile titanium dioxide pigments as a function of their spatial dispersion. Journal of Coatings Technology and Research, v. 6, n. 1, p. 89-97, 2009. DOI: 10.1007/s11998-008-9116-6.

[13] CROLL, S. DLVO theory applied to TiO_2 pigments and other materials in latex paints. Progress in Organic Coatings, v. 44, n. 2, p. 131-146, 2002. DOI: 10.1016/S0300-9440(01)00261-2.

[14] LIU, Y. et al. Evolution mechanism of alumina coating layer on rutile TiO_2 powders and the pigmentary properties. Applied Surface Science, v. 255, n. 16, p. 7427-7433, 2009. DOI: 10.1016/j.apsusc.2009.04.013.

[15] PARK, O. K.; KANG, Y. S. Preparation and characterization of silica-coated TiO_2 nanoparticle. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 257-258, p. 261-265, 2005. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2004.10.014.

[16] CHEMOURS. Titanium Dioxide for Coatings. Wilmington: The Chemours Company, guia técnico Ti-Pure. Seções sobre fabricação, teoria óptica, propriedades pigmentárias e tratamentos superficiais.

[17] ASTM INTERNATIONAL. ASTM D2805-11(2023). Standard Test Method for Hiding Power of Paints by Reflectometry. West Conshohocken: ASTM International, 2023. DOI: 10.1520/D2805-11R23.