

# PREDIÇÃO DA ALVURA DE MISTURAS DE CAULIM ATRAVÉS DO MODELO DE KUBELKA-MUNK: APLICABILIDADE EM CAULINS ULTRAFINOS

Conceição, P.R.N.<sup>1</sup>, Petter, C.O.<sup>2</sup>

1 – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Av. Bento Gonçalves, 9500 - Caixa Postal, 15021 – CEP: 91501-970 – bairro Agronomia – Porto Alegre – RS

[paulonc@ct.ufrgs.br](mailto:paulonc@ct.ufrgs.br)

2 – Departamento de Engenharia de Minas - UFRGS

Av. Bento Gonçalves, 9500 - Caixa Postal, 15021 – CEP: 91501-970 – bairro Agronomia – Porto Alegre – RS

[cpetter@vortex.ufrgs.br](mailto:cpetter@vortex.ufrgs.br)

O caulim é um importante mineral industrial, cujo principal parâmetro é uma propriedade colorimétrica, que depende do espectro de reflectância da amostra, a alvura. A alvura não segue as regras de aditividade como outros minerais, se forem misturadas aliquotas de caulim com alvura e distribuição granulométrica diferentes, ao tentar-se estimar a alvura resultante dessa mistura, ponderada em função da massa, o resultado não estará de acordo com o resultado real da alvura da mistura. Isso ocorre pois a alvura é um parâmetro colorimétrico e como tal é dependente de propriedades óticas como comprimento de onda, espalhamento e absorção da luz, cor de elementos contaminantes, etc. Este estudo mostra a problemática do uso direto da alvura como parâmetro para a determinação da alvura de misturas de caulim e propõe uma alternativa para este problema através da utilização da Função de Kubelka-Munk para corrigir erros obtidos através da ponderação direta pela massa. As amostras utilizadas abrangem caulins com D50 inferior a 2  $\mu\text{m}$ .

**Palavras-chave:** caulim, alvura, Kubelka-Munk.

**Área Temática:** Minerais Industriais

## INTRODUÇÃO

Atualmente é crescente a caracterização de minerais industriais através do uso de suas propriedades colorimétricas, que são originárias da interação entre luz e matéria. O caulim é um desses minerais.

O caulim apresenta propriedades físicas e químicas que permitem seu uso como matéria-prima em diversos produtos industrializados como cerâmica, plástico, tinta, papel, etc (Murray, 1981). Dentre os parâmetros que conferem valor ao caulim pode-se destacar sua distribuição granulométrica e sua alvura. Sendo a alvura seu principal parâmetro. Parâmetros colorimétricos, como a alvura, não possuem a propriedade de ser aditivos, ou seja, não é possível somar diretamente alíquotas de caulim e obter uma alvura média, ponderada com relação à massa das alíquotas, para a amostra resultante. Outro problema encontrado na utilização de parâmetros com base na cor para classificação e para caracterização de minerais está na seleção do material a ser enviado para o beneficiamento. É muito comum que esta decisão seja tomada em função de critérios puramente subjetivos, onde o técnico define visualmente o que é minério e o que é estéril. Estes critérios além de serem subjetivos, também são afetados por fatores como acuidade visual, textura, cor, granulometria, o processo é limitado a um curto período do dia, ou semana, condições climáticas e condições físicas do profissional. Sabe-se, que minérios contaminados por diferentes impurezas e/ou graus dessas impurezas podem visualmente representar a mesma cor. Observadores diferentes podem apresentar impressões diferentes sobre a mesma amostra e também. Todos esses aspectos contribuem para um comportamento diferenciado do material quando este está sendo beneficiado. Desta forma, não sendo correto o uso direto da alvura como parâmetro para ponderações e avaliações. Sendo assim, surgiu a necessidade de buscar uma alternativa para o problema de aditividade. A alternativa para contornar este problema esta no uso da Função de Kubelka-Munk.

O principal objetivo deste estudo é mostrar que a alvura por ser um parâmetro espectral, não pode ser usada diretamente na determinação da alvura resultante de misturas de caulim e que o erro cometido pode ser minimizado pelo uso da Função de Kubelka-Munk para caulins com diâmetro médio de partículas inferior a 2  $\mu\text{m}$ .

## DESENVOLVIMENTO

A Função de Kubelka-Munk ( $F_{km}$ ), é função da reflectância ( $R$ ) de produtos que possuem a mesma granulometria e apresenta comportamento aditivo (Kubelka, 1948; Kürtüm, 1969; Petter, 1994). A relação entre alvura e  $F_{km}$  é expressa da seguinte forma:

$$F_{KM}(R) = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (1)$$

Onde:

$F_{KM}$  é a Função de Kubelka-Munk e  
 $R$  é a alvura.

Para obter-se novamente a alvura (ou reflectância) a partir de um dado valor de  $F_{km}$ , utiliza-se a equação 2:

$$R = 1 + F_{km} - \sqrt{2F_{km} + (F_{km})^2} \quad (2)$$

Trabalhos anteriores (Petter, 1994) apontam que, se os caulins utilizados no *blending* possuem índices ópticos e distribuição granulométrica semelhantes, pode-se utilizar  $F_{KM}$  como diretamente ponderável, ou seja:

$$F_{KM1+2+\dots+n} = c_1 F_{KM1} + c_2 F_{KM2} + \dots + c_n F_{KMn} \quad (3)$$

onde:

$F_{KM1+2+\dots+n}$  - Função de Kubelka-Munk da mistura dos  $n$  caulins;  
 $F_{KMn}$  - Função de Kubelka-Munk do caulim  $n$  e  
 $c_n$  - concentração mássica do caulim  $n$  na mistura.

Como o objetivo do estudo é saber se a função de Kubelka-Munk é válida para amostras que tenham diâmetro médio de partícula menor que 2  $\mu\text{m}$ , a variação do diâmetro médio de partícula para as amostras é de 0,25  $\mu\text{m}$  a 1,18  $\mu\text{m}$ . Sabendo que Kubelka-Munk é válido para misturas que possuam granulometria homogênea e índices óticos iguais são feitas misturas de diferentes amostras de caulim ROM e beneficiado levando-se em consideração sua distribuição granulométrica e alvura.

É feita uma comparação entre a alvura sugerido pela Função de Kubelka-Munk (equação 1), a alvura medida para a mistura (através de espectrofotômetro) e a alvura calculada levando-se em conta a concentração mássica de cada amostra (equação 3).

Foram utilizados cinco grupos de amostras. Para cada grupo foram empregadas 2 amostras. Para cada um desses grupos de amostras foram feitas cinco misturas com variação mássica das duas amostras. As variações mássicas foram (10/90) (20/80) (30/70) (40/60) (50/50) % para cada ensaio. As tabelas de 1 a 5 mostram cada um dos grupos e os dados de cada amostra e cada mistura.

**Tabela 01** – Características do primeiro grupo de amostras e misturas

Grupo 1	D50 ( $\mu\text{m}$ )	Alvura	MB11 (%)	MB12 (%)	MB13 (%)	MB14 (%)	MB15 (%)
A	0,26	85,33	10	20	30	40	50
B	1,18	76,41	90	80	70	60	50

**Tabela 02** – Características do segundo grupo de amostras e misturas

Grupo 2	D50 $\mu\text{m}$	Alvura	MB16 (%)	MB17 (%)	MB18 (%)	MB19 (%)	MB20 (%)
C	0,26	76,48	10	20	30	40	50
D	1,26	85,10	90	80	70	60	50

**Tabela 03** – Características do terceiro grupo de amostras e misturas

Grupo 3	D50 $\mu\text{m}$	Alvura	MB21 (%)	MB22 (%)	MB23 (%)	MB24 (%)	MB25 (%)
E	0,25	81,12	10	20	30	40	50
F	1,13	85,40	90	80	70	60	50

**Tabela 04** – Características do quarto grupo de amostras e misturas

Grupo 4	D50 $\mu\text{m}$	Alvura	MB26 (%)	MB27 (%)	MB28 (%)	MB29 (%)	MB30 (%)
G	0,26	85,84	10	20	30	40	50
H	1,00	80,76	90	80	70	60	50

**Tabela 05** – Características do quinto grupo de amostras e misturas

Grupo 5	D50 $\mu\text{m}$	Alvura	MB31 (%)	MB32 (%)	MB33 (%)	MB34 (%)	MB35 (%)
I	0,25	89,00	10	20	30	40	50
J	1,13	85,40	90	80	70	60	50

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente é feita a comparação entre os resultados obtidos para a alvura resultante das misturas, como citado anteriormente. As tabelas 06 a 10 mostram estes resultados.

A ponderação da alvura em função da massa, para as amostras testadas, na maioria dos testes conduziu a uma superestimação da alvura resultante. Este comportamento repetiu-se, tanto quando o caulim de granulometria mais grossa era o mais alva e quando era o menos alva. Analisando as diferenças entre os resultados obtidos pela Função de Kubelka-Munk e pela ponderação com a alvura, a que se aproxima mais do valor real é a Função de Kubelka-Munk, isto porque a teoria de K-M prediz um relacionamento linear entre dados espectrais e a concentração da amostra.

Os maiores erros cometidos quando se usa a alvura como ponderador podem ser observados na tabela 7, onde, a amostra mais fina é a menos alva e a amostra mais grosseira é a mais alva.

Com a utilização de Kubelka-Munk, o pior resultado encontra-se no quinto grupo (tabela 10) onde a amostra mais alva é a mais fina e a menos alva é a mais grosseira.

O terceiro grupo (tabela 8) mostrou que a diferença entre os dois métodos é mínima.

**Tabela 06** – Resultados obtidos para as misturas do primeiro grupo

Grupo 1	D50 (µm)	Alvura	MB11 (%)	MB12 (%)	MB13 (%)	MB14 (%)	MB15 (%)
A	0,26	85,33	10	20	30	40	50
B	1,18	76,41	90	80	70	60	50
		Alvura-medida	75,27	77,02	77,89	78,925	79,57
		Alvura FR	77,09	77,81	78,55	79,34	80,17
		Alvura-média	77,30	78,19	79,09	79,98	80,87

**Tabela 07** – Resultados obtidos para as misturas do segundo grupo

Grupo 2	D50 (µm)	Alvura	MB16 (%)	MB17 (%)	MB18 (%)	MB19 (%)	MB20 (%)
C	0,26	76,48	10	20	30	40	50
D	1,26	85,10	90	80	70	60	50
		Alvura-medida	82,82	81,73	80,77	79,77	79,22
		Alvura FR	83,94	82,89	81,91	81,00	80,14
		Alvura-média	84,24	83,38	82,51	81,65	80,79

**Tabela 08** – Resultados obtidos para as misturas do terceiro grupo

Grupo 3	D50 (µm)	Alvura	MB21 (%)	MB22 (%)	MB23 (%)	MB24 (%)	MB25 (%)
E	0,25	81,12	10	20	30	40	50
F	1,13	85,40	90	80	70	60	50
		Alvura-medida	84,2	83,755	83,775	83,27	82,37
		Alvura FR	84,90	84,42	83,96	83,51	83,08
		Alvura-média	84,97	84,54	84,12	83,69	83,26

**Tabela 09** – Resultados obtidos para as misturas do quarto grupo

Grupo 4	D50 µm	Alvura	MB26 (%)	MB27 (%)	MB28 (%)	MB29 (%)	MB30 (%)
G	0,26	85,84	10	20	30	40	50
H	1,00	80,76	90	80	70	60	50
		Alvura-medida	80,86	81,27	81,96	82,48	82,81
		Alvura FR	81,19	81,63	82,09	82,56	83,05
		Alvura-média	81,27	81,78	82,28	82,79	83,30

**Tabela 10** – Resultados obtidos para as misturas do quinto grupo

Grupo 5	D50 µm	Alvura	MB31 (%)	MB32 (%)	MB33 (%)	MB34 (%)	MB35 (%)
I	0,25	89,00	10	20	30	40	50
J	1,13	85,40	90	80	70	60	50
		Alvura-medida	84,55	84,81	85,21	85,68	85,84
		Alvura FR	85,71	86,03	86,36	86,70	87,05
		Alvura-média	85,76	86,12	86,48	86,84	87,20

principalmente nos casos em que a quantidade de caulim mais grosseiro excedia a quantidade de caulim com granulometria mais fina.

As variações de concentração mássica entre os constituintes das misturas não parecem influenciar o erro de predição da mistura nos dois métodos, visto que a dimensão do erro mantém uma certa aleatoriedade, ou seja, sendo as concentrações conhecidas o erro não é função das mesmas, ver tabela 11. Analisando separadamente, tanto os testes em que o caulim de granulometria mais grossa excedia o de granulometria mais fina, e os que a fina excedia a grossa, independente de ser mais alvo ou menos alvo, o erro também mostrou-se aleatório na predição via Função de Kubelka-Munk e via ponderação pela massa. Entretanto, analisando a diferença entre os erros cometidos pelas duas formas de predição, pode-se observar que quanto maior for a diferença entre as alíquotas das duas amostras, menor será a diferença entre os dois métodos, ou seja, apesar da certa aleatoriedade no erro, quanto maior for a diferença entre a granulometria e a alvura dos constituintes da mistura, maior será a dificuldade de predição da alvura resultante. Uma das explicações para este problema pode estar no empacotamento formado pelas partículas que pode prejudicar o espalhamento da luz incidente.

**Tabela 11** – Erros obtidos para as misturas dos cinco grupos

Grupo	Erro	(10/90)	(20/80)	(30/70)	(40/60)	(50/50)
1	Erro-FR	1,82	0,79	0,66	0,42	0,60
	Erro-R	2,03	1,17	1,20	1,05	1,30
	Difer-erro	0,21	0,39	0,53	0,64	0,70
2	Erro-FR	1,12	1,16	1,14	1,23	0,92
	Erro-R	1,42	1,65	1,75	1,88	1,57
	Difer-erro	0,29	0,49	0,61	0,66	0,65
3	Erro-FR	0,70	0,66	0,18	0,24	0,71
	Erro-R	0,77	0,79	0,34	0,42	0,89
	Difer-erro	0,07	0,12	0,16	0,18	0,18
4	Erro-FR	0,33	0,36	0,13	0,08	0,24
	Erro-R	0,41	0,51	0,33	0,31	0,50
	Difer-erro	0,08	0,15	0,20	0,23	0,25
5	Erro-FR	1,16	1,22	1,15	1,02	1,21
	Erro-R	1,21	1,32	1,27	1,17	1,37
	Difer-erro	0,05	0,09	0,12	0,14	0,15

## CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, a função de Kubelka-Munk torna a estimativa para o resultado da alvura final de uma mistura de caulins com tamanho médio de partícula inferior a 2  $\mu\text{m}$ , mais exata que a utilização direta da alvura como ponderador.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq pelo financiamento das pesquisas desenvolvidas, pela empresa que forneceu as amostras para os ensaios (o nome não pode ser revelado devido a acordo de confidencialidade) e ao Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa – ENTMME pela oportunidade de divulgação deste estudo.

## REFERÊNCIAS

- CONCEIÇÃO, P.R.N. – **Predição do espectro de reflectância resultante de misturas de caulim**, Dissertação Mestrado, UFRGS, Porto Alegre – RS, 136 pp, 2000.
- CONCEIÇÃO, P.R.N. – **Comparação entre a alvura medida a 460 nm e a alvura calculada utilizando-se como base todo o espectro de reflectância**, VI SOUTHERN HEMISPHERE MEETING ON MINERAL TECHNOLOGY, CETEM/MCT, V3, Rio de Janeiro – Brasil, p.226-229, 2001.
- KORTÜM, G. – **Reflectance Spectroscopy: principles, methods, applications**, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 366pp, 1969.
- KUBELKA, P. – **New contributions to the optics of intensely light-scattering material (Part I)**, Journal of the optical society of America, Vol. 38N.5, p. 448-457, 1948.
- PETTER, C.O. – **Contribution à l'Étude de la Valorisation de Kaolins pour l'Industrie Papiere: Mise au Point D'une Methodologie Colorimetrique, application à la selectivité minière**, Tese de Doutorado – École des Mines de Paris, 300pp, 1994.
- MURRAY, H.H. – **Kaolin Project in the Amazonia area**, Society of Engineers of AIME, Brazil, p. 81-87, 1981.