Cerâmica
Industrial

Otimização do Processo de Moagem de Engobes Cerâmicos para Produção de Revestimento

V.S. Nandi*[a,b], *O.R.K. Montedo*[b]

[a]*Cerâmica Novagres Ltda,*
Rodovia Genésio Mazon, SC 445, km 19, 88840-000, São Pedro, Urussanga - SC, Brasil
[b]*Unidade Acadêmica de Ciências, Engenharias, e Tecnologia – UNACET,*
Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC,
Av. Universitária, 1105, CP 3167, 88806-000, Bairro Universitário, Criciúma - SC, Brasil
**e-mail: oscar.rkm@gmail.com*

Resumo: Na indústria cerâmica, o principal objetivo do processo de moagem é a redução do tamanho das partículas das matérias-primas através da ação dos corpos moedores, que normalmente é realizada em moinhos de bolas de alta alumina. O impacto e o atrito provocados entre os corpos moedores e as paredes internas sobre as matérias-primas promovem a cominuição das partículas. Entretanto, a otimização do processo de moagem, visando melhorar-se a eficiência energética do sistema, depende de diversos fatores, tais como a distribuição de tamanhos dos corpos moedores e a velocidade de rotação do moinho, objeto deste trabalho. Assim, este trabalho foi dividido em três etapas: investigação da influência da distribuição de tamanhos dos corpos moedores (bolas de alta alumina); investigação da influência da rotação no tempo de moagem; e caracterização final do engobe obtido com a melhor condição de moagem encontrada. Os melhores resultados apresentaram uma redução do tempo de moagem de 57% para moagem de engobe, de 10,5 para 4,5 horas.

Palavras-chave: *moagem, engobe, tempo de moagem, eficiência energética.*

1. Introdução

As empresas cerâmicas sempre procuraram desenvolver seus produtos e processos, no sentido de atender cada vez melhor o mercado consumidor. Entretanto, nos últimos anos, a velocidade destas mudanças tem sido aumentada. A busca pela inovação tecnológica tem sido uma ação estratégica para garantir a sobrevivência das empresas[1]. Avanços no nível de automação do processo cerâmico têm permitido às empresas atingir níveis mais elevados de qualidade e produtividade[2]. Além disso, o custo operacional do processo de produção de revestimentos cerâmicos tem sido reduzido com várias ações relacionadas à eficiência energética[3,4,5]. Especificamente em relação à moagem de materiais cerâmicos[6], variáveis como a natureza das matérias-primas, a densidade da suspensão e a taxa de ocupação do moinho têm sido investigadas. Todavia, as condições ótimas de operação dos moinhos dependem de um estudo em cada processo produtivo, já que as variáveis que interferem no processo de moagem variam significativamente em cada indústria cerâmica. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo aperfeiçoar este processo para a redução do tempo de moagem de engobes cerâmicos na Cerâmica Novagres.

2. Materiais e Métodos

2.1. Materiais

Para realizar este trabalho, foi utilizado o engobe de monoqueima com o código interno EM-04, empregado na preparação de esmaltes da Cerâmica Novagres, com algumas de suas características apresentadas na Tabela 1.

Os equipamentos utilizados neste trabalho foram:

- Moinho tambor, modelo MBC 3000 L Cardall, diâmetro interno de 1,46 m e comprimento interno de 1,5 m, capacidade máxima admissível de 6400 kg;
- Moinho tambor, modelo MBC 10000 L Cardall, capacidade máxima admissível de 18000 kg.
- Balança Toledo, capacidade de 2500 kg;
- Peneira de laboratório Servitech malha 325 mesh;
- Peneira de laboratório Servitech malha 60 mesh;
- Binil Servitech aberturas 3 e 6 mm;
- Densímetro Servitech;
- Viscosímetro Servitech Copo Ford nº 4;
- Cronômetro Technos;
- Analisador de tamanhos de partículas a laser LS COULTER;
- Forno Barbieri Tarozi, modelo 2005 com 156 m;
- Trena de 3 m; e
- Colorímetro Byk-Gardner.

2.2. Métodos

A sequência operacional empregada neste trabalho pode ser resumida em 3 etapas: investigação da influência da distribuição de tamanhos de bolas no tempo de moagem, investigação da influência da velocidade de rotação no tempo de moagem e caracterização final do engobe obtido com a condição de moagem otimizada. As distribuições de bolas empregadas nos testes são mostradas na Tabela 2, sendo que em todos os casos o volume útil do moinho foi 52%.

Na primeira etapa, foram realizados três testes em escala industrial, no intuito de reduzir o tempo de moagem por meio do emprego de diferentes distribuições de corpos moedores em um moinho de 3000 L. A distribuição de tamanhos de bolas padrão (alta alumina com densidade de 3,6 g.cm^{-3}) do moinho empregado neste estudo era: 20% de bolas de 50 mm, 55% de bolas de 40 mm e 25% de bolas de 30 mm, com volume de ocupação de bolas de 32% do volume útil do moinho. Então, foi realizada uma moagem nas condições padrão com o engobe empregado neste trabalho. Ao término da moagem, foi retirada uma alíquota de engobe (cerca de 1 L) para a determinação do resíduo, da

Tabela 1. Características do engobe utilizado.

Composto	$\alpha_{25\text{-}325^{o}C}$ ($\times 10^{7}\,^{\circ}C^{-1}$)	Ts (°C)	Tempo de escoamento (segundos)	Densidade ($g.cm^{-3}$)	Utilização
EM-04	67,6	1040	50-70	1,83-1,87	Engobe de porcelanato impermeável

Fonte: Autor, 2009.

Tabela 2. Distribuições de tamanhos de bolas empregadas.

Teste	Diâmetro de bolas (mm)	50	40	30	20	Total
1	% de bolas	20%	35%	45%	–	100%
	Quantidade de bolas (kg)	565	987	1268	–	2820
2	% de bolas	15%	20%	40%	25%	100%
	Quantidade de bolas (kg)	422	565	1128	705	2820
3	% de bolas	–	35%	40%	25%	100%
	Quantidade de bolas (kg)	–	987	1128	705	2820

Fonte: Autor, 2009.

Tabela 3. Resultado dos testes de distribuição de bolas.

Condição de moagem	Amostra	Tempo de moagem (horas)	Resíduo (%)	Densidade ($g.cm^{-3}$)	Tempo de escoamento (segundos)
Padrão	1	10,5	0,7	1,86	54
Teste 1	2	2	8,2	1,83	30
	3	3	4,5	1,83	33
	4	4	2,0	1,85	48
	5	5	0,7	1,85	49
Teste 2	6	2	7,5	1,87	66
	7	3	2,5	1,86	60
	8	4	1,2	1,86	59
	9	5	0,5	1,85	46
Teste 3	10	2	7,8	1,84	39
	11	3	3,7	1,86	55
	12	4	1,3	1,86	59
	13	5	0,4	1,86	64

Fonte: Autor, 2009.

densidade, do tempo de escoamento e da distribuição de tamanhos de partículas a laser. O engobe foi então descarregado sob peneiramento em tanque de repouso. Então a carga de bolas com a distribuição padrão foi descarregada do moinho de teste e efetuada suas medidas internas, diâmetro e comprimento, por meio de uma trena. Em seguida foram reclassificadas todas as bolas, separando-as por tamanho, onde as medidas padrão foram realizadas com ajuda de um paquímetro. A seguir foi determinada a quantidade de material a moer (carga seca). Então o moinho foi recarregado com a distribuição de bolas do Teste 1 e com a carga padrão de engobe, água e aditivo. A seguir foi realizada a moagem, interrompendo-a em tempos pré-definidos para a retirada de alíquota de suspensão para determinação do resíduo, da distribuição de tamanhos de partículas a laser e das características superficiais após queima. Após a retirada de cada alíquota de engobe em cada tempo pré-determinado, o moinho era posto novamente em operação. Quando o resíduo de moagem atingiu o valor padrão, isto é, 0,5-1,0% em peso em malha 325 mesh, o moinho era desligado, determinava-se o resíduo, o tempo de escoamento e a densidade do engobe, e separava-se uma alíquota deste para avaliação posterior das características superficiais após queima. A seguir o engobe era descarregado sob peneiramento em tanque de repouso. Posteriormente, este procedimento foi repetido para as demais distribuições de bolas planejadas. Na sequência, a distribuição de bolas que resultou em uma melhor eficiência de moagem foi empregada para a avaliação da influência da velocidade de rotação do moinho no tempo de moagem. Nesta etapa foi empregado um moinho de 10000 L com inversor de frequência instalado. Primeiramente, foi realizado o teste com velocidade de rotação do moinho de 11,77% menor do que o padrão. Então foi colocada uma carga padrão de engobe, água e aditivo e deixou-se moer até atingir o valor padrão do resíduo de moagem (0,5-1,0% em peso em malha 325 mesh), então o moinho foi desligado. Determinou-se também o tempo de escoamento e a densidade do engobe, e também foi separada uma alíquota deste para avaliação posterior das características superficiais após queima. A seguir o engobe foi descarregado sob peneiramento em tanque de repouso. Em seguida, foi realizado o teste com velocidade de rotação do moinho 11,77% maior do que o padrão. Por fim, as alíquotas dos testes referentes às condições de moagem da primeira e da segunda atividade experimental foram submetidas à aplicação em binil, para ensaio de caracterização do engobe como: cor (medidas através de colorimetria), textura, fusibilidade e impermeabilidade (marca d'água).

3. Resultados e Discussão

Primeiramente, a Tabela 3 mostra os resultados de moagem com a distribuição de bolas padrão e com as distribuições de teste mostradas na Tabela 2.

A Tabela 3 mostra a seguinte tendência: quanto menor o tamanho médio das bolas (corpos moedores), em relação à distribuição de bolas padrão, menor o tempo de moagem para a obtenção do resíduo na

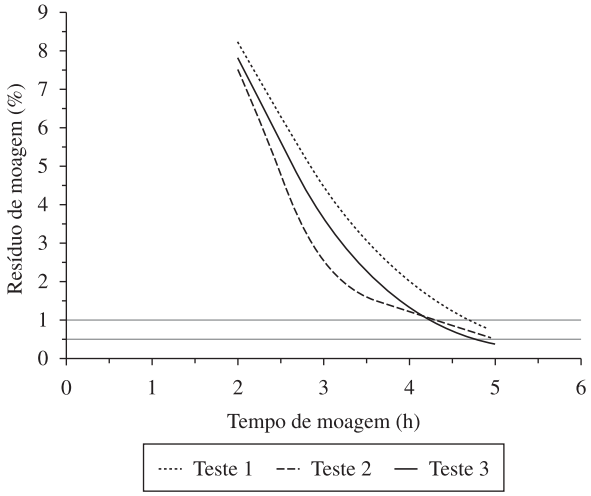

Figura 1. Resíduo de moagem em função do tempo de moagem para várias distribuições de tamanhos de bolas. Fonte: Autor, 2009.

Tabela 4. Coordenadas colorimétricas do teste de distribuição de bolas.

Teste	ΔL	Δa	Δb	ΔE
1	0,40	0,08	–0,18	0,44
2	0,45	0,25	0,52	0,52
3	0,98	–0,18	–0,03	0,99

Fonte: Autor, 2009.

faixa estabelecida (0,5-1,0% em peso). A moagem com a distribuição de bolas padrão foi realizada com um tempo total de 10,5 horas para a obtenção de resíduo entre 0,5-1,0% em peso na peneira malha 325 mesh. Todavia, o Teste 1 apresentou uma redução de 52% no tempo de moagem (5 horas) comparado ao padrão, para o mesmo percentual de resíduo, com densidade e tempo de escoamento dentro da faixa de controle estabelecida pela empresa. Já nos Testes 2 e 3, o tempo de moagem foi reduzido para 4,7 horas, para um resíduo de moagem de 0,7%. Pode-se dizer, com isto, que apenas alterando a distribuição de corpos moedores (bolas de alta alumina), mantendo-se a mesma quantidade de carga de bolas (kg), consegue-se reduzir o tempo de moagem do engobe (Figura 1).

Também é possível observar que a eficiência de moagem de engobe é maior para distribuições de tamanhos de bolas menores, devido à elevada percentagem de material argiloso presente na composição do engobe, em relação à composição de um esmalte tipicamente constituído de fritas. Desta forma, deve-se priorizar o efeito do atrito dos corpos moedores sobre as partículas dos constituintes do engobe para o melhor aproveitamento da moagem.

As peças cujas amostras de engobes moídos nas condições padrão e de teste foram aplicadas em binil, queimadas e posteriormente cortadas, não apresentaram diferença de textura ou de cor a olho nu. Assim, foi realizada a avaliação da cor por colorimetria, cujos resultados são mostrados na Tabela 4.

As coordenadas colorimétricas mostram uma maior diferença no Teste 3, o que indica uma influência direta na tonalidade do produto. Os resultados foram mais satisfatórios para o Teste 1, pois foi o que apresentou o valor de ΔE mais baixo. Considerando valores de ΔE em um intervalo de 0,5 a 0,7 CIELAB como aceitáveis para se obter um bom nível de qualidade no produto final, os Testes 1 e 2 apresentaram os melhores resultados de colorimetria. Apesar disto, o Teste 1 foi escolhido para a etapa seguinte do estudo, pois naquele momento não seria necessária a aquisição de bolas de alta alumina de tamanho de 20 mm para os demais moinhos.

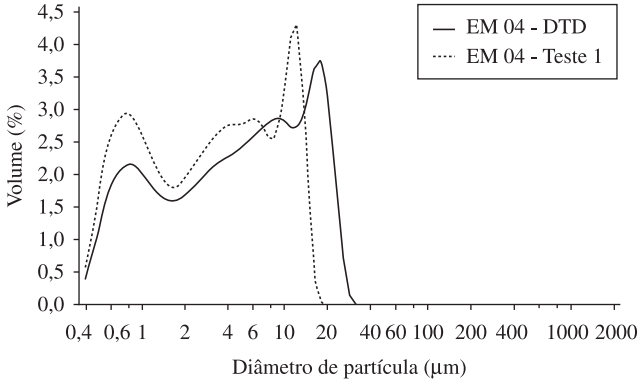

Figura 2. Distribuição de tamanhos de partículas do engobe EM-04 moído nas condições padrão e do Teste 1 Fonte: Autor, 2009.

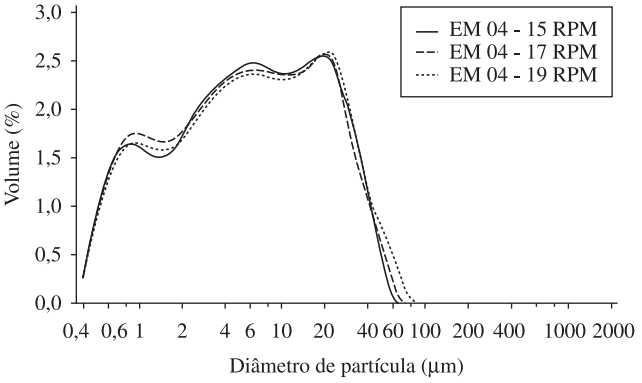

Figura 3. Distribuição acumulativa de tamanho de partícula devido à variação da distribuição de tamanho de bolas do moinho. Fonte: Autor, 2009.

A distribuição granulométrica da Figura 2 mostra uma redução significativa do tamanho médio de partículas obtido com as condições de moagem do Teste 1, em comparação às condições de moagem padrão. Esta redução no tamanho médio de partículas (Figura 3) faz com que o engobe se torne mais reativo, já que aumenta sua área superficial, permitindo um aumento da impermeabilidade do engobe pós queima.

De fato, a Figura 3 mostra que o tamanho médio de partículas foi reduzido de 4,8 (moagem na condição padrão) para 3,5 μm (moagem nas condições do Teste 1).

A Tabela 5 mostra que com a rotação menor (Teste 4), o tempo de residência do material no moinho tende a ser maior, já que as bolas deslizam pouco no seu interior, reduzindo a eficiência de moagem e aumentando o desgaste do corpo moedor. Importante ressaltar que a ação moedora do meio de moagem depende da velocidade de rotação do moinho, que por sua vez está ligada diretamente à aceleração centrípeta e à força da gravidade agindo sobre o corpo moedor. Assim, velocidades de rotação muito baixas não promovem suficiente ação moedora sobre o material a moer.

Já com o Teste 5, aumentando-se a velocidade de rotação do moinho em relação à velocidade padrão, conseguiu-se o mesmo tempo de moagem, porém com resíduo um pouco mais baixo. Entretanto, nesta velocidade notou-se um elevado aquecimento no motor do moinho e também ultrapassou a potência máxima de 37 kW.

Quanto menor for a velocidade de rotação do moinho, menor vai ser o consumo de energia elétrica, já que diminui-se consideravelmente a potência, porém com aumento do tempo de moagem. Dessa forma, a velocidade do moinho é um parâmetro

Tabela 5. Resultado dos testes de variação da velocidade de rotação do moinho.

Condição de moagem	Rotação (rpm)	Tempo de moagem (horas)	Resíduo (%)	Densidade ($g.cm^{-3}$)	Tempo de escoamento (segundos)
Padrão	17	4,5	0,9	1,86	52
Teste 4	15	6,0	1,0	1,85	52
Teste 5	19	4,5	0,8	1,86	48

Fonte: Autor, 2009.

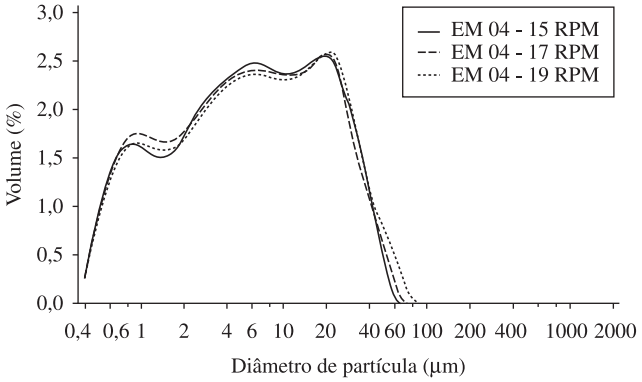

Figura 4. Distribuição de tamanhos de partículas para as diferentes velocidades de rotação do moinho investigadas. Fonte: Autor, 2009.

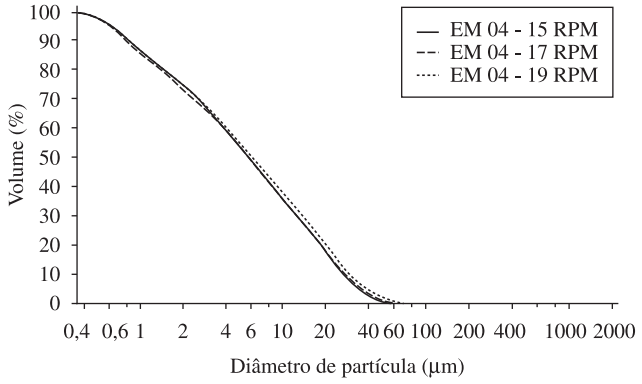

Figura 5. Distribuição acumulativa de tamanho de partículas para as diferentes velocidades de rotação do moinho investigadas. Fonte: Autor, 2009.

muito importante de operação, que deve ser muito bem avaliado e controlado.

Observando a Figura 4, constata-se que as curvas granulométricas dos testes de velocidade de rotação acima e abaixo do valor padrão não sofreram alterações significativas. Pode-se observar apenas uma pequena diferença no gráfico acumulativo (Figura 5), onde o tamanho médio de partícula do teste com 15 rpm é praticamente igual ao do padrão (17 rpm); por outro lado, o teste com 19 rpm apresentou tamanho médio de partícula maior.

A Tabela 6 mostra os valores das coordenadas colorimétricas dos Testes 4 e 5, com velocidades de rotação do moinho de 15 e de 19 rpm, respectivamente.

De acordo com estes resultados, o Teste 4 foi reprovado, já que o valor de ΔE foi bem superior ao limite máximo aceitável (ΔE = 1,0). Assim, o engobe produzido nas condições do Teste 4 deve interferir diretamente na cor do material, podendo até mudar sua tonalidade, principalmente se o material for produzido com esmalte transparente, onde o que predomina é a cor do engobe. Como foi visto, quanto

Tabela 6. Coordenadas colorimétricas dos testes de velocidade de rotação.

Velocidade de rotação (rpm)	ΔL	Δa	Δb	ΔE
15	–1,85	0,19	0,72	1,99
19	0,25	–0,24	0,04	0,34

Fonte: Autor, 2009.

menor a velocidade de rotação, maior é o tempo de moagem, e, portanto, maior o custo energético, e maior o valor de ΔE. Desta forma, ficou demonstrado que a moagem ininterrupta com velocidade de rotação de 17 rpm com a distribuição de tamanho de bolas do Teste 1, levou à redução do tempo de moagem do engobe testado para 4,5 horas, 57% inferior à condição de moagem anterior.

Além da avaliação da cor por colorimetria, o teste de marca d'água foi realizado. A marca d'água é um dos ensaios mais importantes na caracterização de um engobe. O problema maior que pode surgir com o material reprovado neste ensaio é quando ele é assentado em um banheiro ou em ambientes submetidos a grandes quantidades de água, pois a maioria dos revestimentos cerâmicos absorve água, fazendo com que suas laterais escureçam, causando um efeito semelhante ao de uma moldura na peça. Todas as amostras submetidas a este teste foram aprovadas, não apresentando manchas em sua superfície.

A avaliação econômica do trabalho realizado deve ser efetuada para justificar o investimento realizado. A produção do Forno FW-01 da Novagres é de 270.000 m², com um consumo médio de engobe e esmalte de 326 t. Para isto, o setor de preparação de esmaltes possui 6 moinhos, onde sua produção mensal pode chegar a 620 t.

Atualmente, o setor de preparação de esmaltes está com tempo ocioso de moagem. Porém a Cerâmica Novagres pretende aumentar sua capacidade produtiva, com a aquisição de um forno com capacidade de 450.000 m^2, que somada à produção atual, irá consumir cerca de 630 t de engobe e esmalte ao mês, ultrapassando a capacidade máxima de produção da preparação de esmaltes.

Por outro lado, com a redução do tempo de moagem dos moinhos obtida com este trabalho, aumentou-se a capacidade produtiva da preparação de esmaltes de 620 para 1.050 $t.mês^{-1}$, mantendo-se a mesma carga horária de trabalho. Se a condição de moagem anterior fosse mantida, seria necessária a aquisição de mais um moinho de 5.000 L, que custa cerca de R$ 95.000.00, ou modificar a carga horária de trabalho do setor de preparação de esmaltes para 24 horas, sendo necessária a contratação de mais um funcionário.

Outro benefício muito importante está relacionado à diminuição do consumo de energia. Com a implementação dos resultados obtidos neste trabalho, o consumo de energia elétrica na moagem foi reduzido de R$ 212,16, referente a 6 moinhos com 16 horas de moagem cada, para R$ 92,82, referente aos mesmos 6 moinhos com 7 horas de moagem cada, que representa uma redução de 56,25%. Isto representa uma economia de R$ 2.363,00 ao mês.

Além disto, deve se considerar o aumento relativo da vida útil do moinho, já que cada moinho vai efetuar uma quantidade maior de moagens para a vida útil estimada pelo fornecedor do revestimento interno dos moinhos de 10 anos. Considerando que o custo para a troca do revestimento interno dos moinhos é de aproximadamente

R$ 180.000,00 para todos os moinhos a cada 10 anos, isto representa um custo mensal de R$ 1.500,00 para os 6 moinhos. Desta forma, a redução do custo da troca do revestimento interno dos moinhos foi de R$ 2,41, para a capacidade produtiva máxima de 620 t, para R$ 1,42 com a implementação deste trabalho. Isto representa uma economia mensal aproximada de R$ 322,00. Além disso, para este trabalho, foi necessária a aquisição de 9000 kg de bolas de alta alumina nos seguintes diâmetros: 50, 40 e 30 mm. Com o custo médio de R$ 5,58 por kg de bola, houve um investimento de R$ 50.220,00.

Considerando-se os benefícios obtidos neste trabalho com a redução do tempo de moagem e de energia por moagem e o aumento da vida útil do moinho, além da eliminação da necessidade de aquisição de um moinho, e o investimento realizado com a carga de bolas de alta alumina, obtém-se uma economia de R$ 97.685,00, cujo tempo de amortização é imediato. Porém a linha nova de produção da Cerâmica Novagres está projetada para 2010; então, desconsiderando o custo de aquisição do moinho de 5000 L, tem-se uma economia mensal de R$ 2.685,00, representando um tempo de amortização de 18,7 meses.

Entretanto, além do ganho econômico-financeiro, há também o ganho técnico. Com a redução de 57% no tempo de moagem, pôde-se notar uma redução da variação do tempo de escoamento em função do tempo de moagem. É possível que os aditivos empregados, carboximetilcelulose (CMC) e tripolifosfato de sódio (TPF), que servem exatamente para ajudar a manter o tempo de escoamento das suspensões por um tempo maior após a moagem, tenham sido menos degradados devido à diminuição do aquecimento e do atrito excessivo e, assim, tenham conseguido manter sua característica por mais tempo. De fato, o menor tempo de moagem alcançado pelas novas condições padrão permitiu manter-se o tempo de escoamento desejado por vários dias, muito superior à condição obtida anteriormente.

4. Conclusão

Um estudo foi realizado para se obter a redução do tempo de moagem de engobes cerâmicos na Cerâmica Novagres, considerando a mudança da distribuição dos tamanhos dos corpos moedores e da velocidade de rotação dos moinhos.

Os melhores resultados demonstraram uma redução de 57% no tempo de moagem, de 10,5 para 4,5 horas, para uma mesma distribuição granulométrica das partículas da suspensão e um mesmo resíduo de moagem. Esta redução permitiu diminuir o consumo de energia elétrica, aumentar a vida útil dos moinhos, reduzir o custo operacional do processo de moagem de engobes, eliminar a necessidade de investimento de um novo moinho de alta alumina para o setor de preparação de esmaltes, devido à instalação de uma nova linha produtiva, e aumentar a estabilidade reológica do engobe.

Referências

1. FIOLA, L. J. C.; CAMAHORTB, V. G.; YUSTEC, F. M. **Gestão do Portfólio de Produtos e Elaboração de um Guia para a Análise da Carteira de Produtos. Cerâmica Industrial**, v. 14, n. 1, p. 7-13, 2009.
2. BARBOSA, D. S. et al. **Controle e Automação na Indústria Cerâmica: Estudo de Caso na Fabricação de Porcelanato no Brasil. Cerâmica Industrial**, v. 13, n. 4, p. 23-30, 2008.
3. CETESB. **Guia técnico ambiental da indústria de cerâmica branca e de revestimento - Série P+L.** São Paulo: CETESB, 2006. 84 p.
4. INEE. **A eficiência energética e o novo modelo energético**. Rio de Janeiro: INEE, 2001. 74 p.
5. RENOLFI, G. Redução dos custos de gestão através do correto aproveitamento e recuperação de energia. **Cerâmica Informação,** n. 622, p. 28-30, 2009.
6. RIBEIRO, M. J. P. M.; ABRANTES, J. C. C. Moagem em Moinho de Bolas: Estudo de algumas Variáveis e Otimização Energética do Processo. **Cerâmica Industrial**, v. 6, n. 2, p. 7-11, 2001.