



UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE

Curso de Tecnologia em Cerâmica

Trabalho de Conclusão de Curso



Estudo da influência do regime de moagem na distribuição granulométrica da barbotina

José Eduardo Tavares Cordioli

Oscar Rubem Klegues Montedo¹

Resumo: A moagem descontínua em moinhos de bolas é um processo de redução granulométrica frequente na preparação de massa para fabricação de revestimentos cerâmicos. Em um processo cerâmico a baixa produtividade oriunda de um tempo de moagem excessivo interfere diretamente nos custos de produção das empresas. No estudo realizado, foram feitas alterações no regime de moagem de matérias-primas para a produção de um porcelanato técnico, modificando a velocidade de rotação do moinho ao longo do período por meio de um inversor de frequência. Foi analisada a influência da mudança do regime de moagem sobre a distribuição granulométrica e do resíduo de moagem da barbotina, que deve ser inferior a 3,5%, e apresentando uma redução de aproximadamente uma hora no tempo de moagem. A distribuição granulométrica final da curva de moagem teste se mostrou similar ao padrão. As propriedades do produto analisadas pela caracterização a seco e queimado de densidade aparente, perda ao fogo, retração de queima, absorção de água e colorimetria de corpos-de-prova apresentaram valores dentro de limites de variação adequados ao processo produtivo. Como consequência, foi observada redução do consumo de energia elétrica e ganho de produtividade do porcelanato técnico.

Palavras-chave: porcelanato, moagem, barbotina, granulometria.

1. Introdução

Segundo a Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmica, o Brasil é um dos principais protagonistas no mercado mundial de revestimentos cerâmicos, ocupando a segunda posição em produção e consumo. Os fabricantes brasileiros estão alinhados com a maior tecnologia disponível no mundo, e a quase totalidade de sua produção está em conformidade com as normas internacionais de qualidade (ANFACER, 2013).

¹ professor orientador

A competitividade é muito grande entre as empresas. Um fator decisivo para se manter competitivo no mercado é produzir um produto de elevada qualidade com custo cada vez menor. Para se reduzir o custo de um produto cerâmico, a atuação no processo pode se dar de várias formas, entre elas: redução no tempo de moagem, aumento de disponibilidade de massa para a mesma capacidade instalada, redução dos custos produtivos, entre outros.

Nandi e Montedo (2009) realizaram um estudo para redução do tempo de moagem em engobes cerâmicos alterando a distribuição dos tamanhos dos corpos moedores e a velocidade de rotação dos moinhos. O estudo obteve uma redução de 57% no tempo de moagem, reduzindo o consumo energético e aumentando da vida útil dos moinhos.

Foi realizado um estudo verificando a influência do resíduo *in natura* das matérias-primas, carga de bolas e resíduo final no tempo de moagem via úmida em moinho de bolas. Concluiu-se que, em ordem de prioridade, considera-se o resíduo final a principal causa na variação do tempo de moagem (BOSA *et al.*, 2007).

Para Barba *et al.* (2002), a distribuição de tamanho de partículas, entre outros fatores, determina as propriedades de um produto cerâmico acabado, como sua porosidade, tamanho do poro, resistência mecânica e textura, e regula o comportamento da suspensão cerâmica durante o processo de fabricação. As características das partículas são determinantes durante o processo de moagem das matérias-primas.

A necessidade de atender a determinadas especificações técnicas dos revestimentos cerâmicos exige um conjunto de operações unitárias durante seu processo de fabricação, que permita que as reações entre as matérias-primas utilizadas ocorram segundo critérios de formulação (DAROLT, 2009).

Assim, o objetivo deste trabalho foi a diminuição do tempo de moagem de uma formulação de porcelanato técnico, alterando-se o regime de trabalho do moinho por meio da variação na velocidade de rotação ao longo do período de moagem. A fim de se obter as mesmas características no produto final de porcelanato técnico, foi avaliada a distribuição granulométrica e o resíduo de moagem da suspensão cerâmica nas condições padrão de moagem e após as alterações na curva de moagem.

2. Materiais e Métodos

Para a realização desse procedimento foi utilizada uma formulação padrão de porcelanato técnico, composta por feldspatos, argilas e caulins como matérias-primas, de uma empresa cerâmica em Criciúma-SC. Como o produto trata-se de um porcelanato técnico, há a exigência de um tipo exclusivo de moagem, onde as matérias-primas plásticas são inicialmente moídas separadamente dos materiais rochosos. Os materiais plásticos passam por um processo de dispersão com água e defloculantes em moinhos de 16.000 L, utilizando-se seixos como meios de moagem por um tempo de 2 h. Após esta dispersão, a pré-barbotina é bombeada e misturada com os demais materiais não plásticos em moinhos maiores de 26.000 L com bolas de alta alumina. O tempo de moagem após esta mistura é em média de 10 h, devido ao alto grau de dureza dos materiais rochosos.

O estudo foi realizado em um moinho de bolas descontínuo da empresa, no qual possui um inversor de frequência modelo CFW-11 para alteração da velocidade de rotação do moinho ao longo do tempo de moagem.

Primeiramente, foi coletada uma amostra de curva padrão de moagem, a partir de 4 h de moagem e depois sucessivamente a cada 1 h até o término da moagem, que foi estabelecido quando o resíduo de moagem atingiu 3,5% em malha #325 mesh (45 μ m). O resíduo é calculado conforme a Equação 1.

$$\%RB = \frac{P_r}{M_b \times \%CS} \times 10000 \quad [1]$$

Onde %RB é o resíduo de moagem percentual da barbotina, P_r é o peso do resíduo retido na peneira e seco (em g), M_b é a massa de barbotina da amostra (em g) e %CS é o teor de sólidos na suspensão cerâmica.

Em outra moagem foi alterada a velocidade de rotação do moinho para sua velocidade crítica, V_c em rpm, calculada a partir da Equação 2.

$$V_c = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \quad [2]$$

Sendo D o diâmetro interno do moinho igual a 2,95 m. A velocidade crítica calculada foi de 24,6 rpm. Porém, na condição fabril, a velocidade máxima possível com o inversor de frequência é de 15,5 rpm, devido à limitação do motor do moinho.

A partir desta informação, foram desenvolvidas duas curvas de moagem, junto com o inversor de frequência, variando-se a velocidade (em rpm) ao longo do período de moagem, conforme demonstrado na Figura 1.

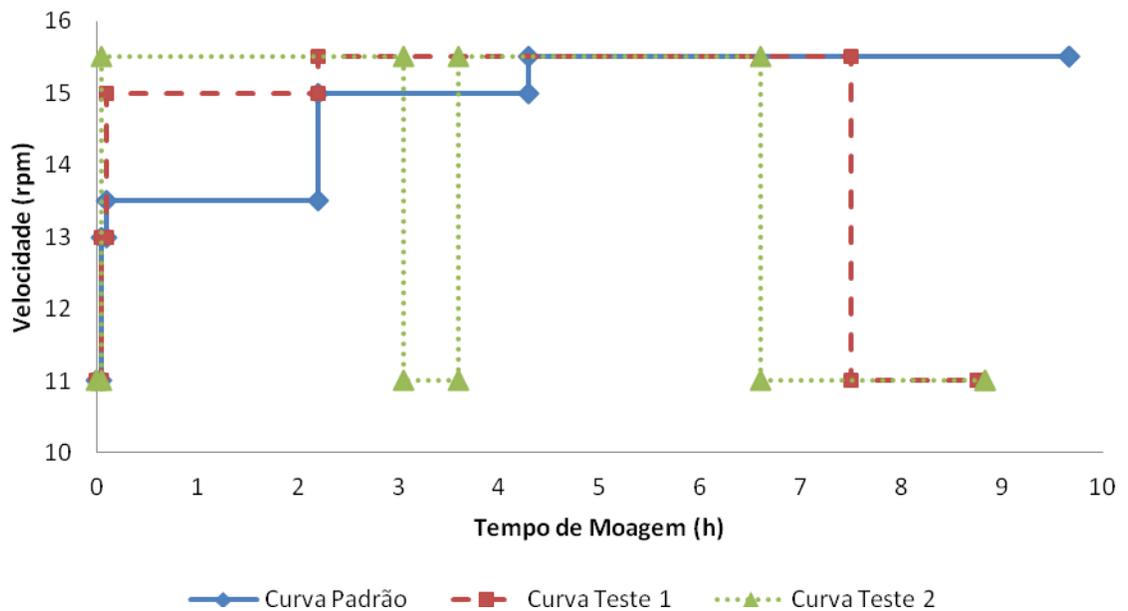


Figura 1 – Curva padrão e testes de moagem.

Fonte: AUTOR, 2013.

Foram realizadas coletas de amostras da barbotina para os testes realizados, conforme mencionado anteriormente para o padrão, sendo determinado o resíduo de moagem a partir de 4 h até o final da moagem para cada regime. Em seguida foi determinada a distribuição do tamanho de partículas de cada uma das amostras de barbotina coletadas em um granulômetro por difração a laser CILAS 1064L. A partir dos resultados das duas primeiras curvas testes, foi feita mais uma curva teste final, buscando-se a condição ideal de moagem, conforme demonstrado na Figura 2.

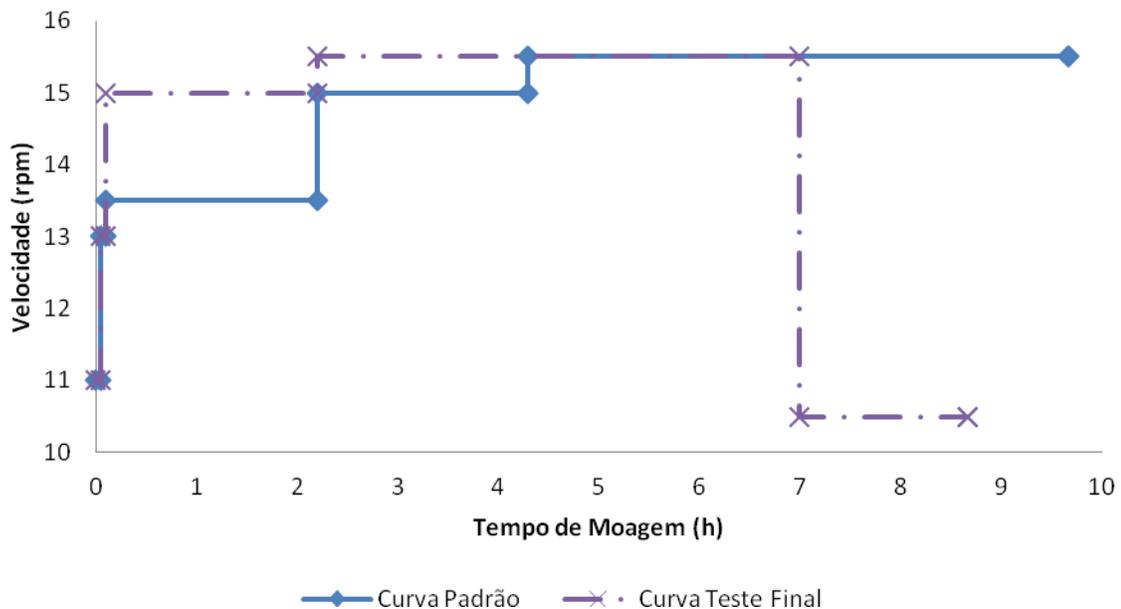


Figura 2 – Curva padrão e teste final de moagem.

Fonte: AUTOR, 2013.

Para se avaliar a influência da alteração do regime de moagem nas características do produto final, foram confeccionados corpos-de-prova em laboratório, utilizando-se as barbotinas da condição padrão e teste da curva que apresentou o melhor resultado de moagem. O procedimento para a obtenção dos corpos-de-prova consistiu na secagem da barbotina em estufa laboratorial Servitech modelo CT:317M72 com temperatura de 125 ± 25 °C, destorroamento com auxílio de almofariz e pistilo da massa seca, peneiramento em malha #40 mesh (425 μm) para separação do pó seco fino, umidificação do pó com 7% de umidade utilizando borrifador, peneiramento posterior em peneira malha #20 mesh (850 μm) para desagregar os grumos de umidade, conformação em prensa hidráulica laboratorial Gabbrielle modelo L4/110 com pressão específica de 480 kgf/cm², secagem dos corpos-de-prova em estufa laboratorial Servitech modelo CT:317M72 e queima em forno a rolo laboratorial Servitech CT-094/S150 a temperatura máxima de 1180, 1200 e 1220 °C em ciclo de 50 min. e patamar de queima de 10 min.

Para caracterização dos corpos-de-prova, foram realizados os ensaios de densidade aparente a seco e a queimado em empuxo de mercúrio, retração linear de queima com auxílio de paquímetro digital Mitutoyo modelo CD-6"CSX-B com precisão de 0,01 mm, perda ao fogo pela pesagem em balança digital BEL modelo Mark 4100 de resolução de 0,01 g antes e após a queima, assim como absorção de água pela pesagem após 2 h imersa em água fervente. Também foi determinada a colorimetria na escala CIELAB, utilizando espectrofotômetro BYK Spectro-Guide, no qual se obtém o resultado nas coordenadas: L, indo de 0 (escuro) a 100 (claro); a, sendo menor que zero (negativo) para verde e maior que zero (positivo) para vermelho; e b, sendo negativo para azul e positivo para amarelo. A diferença de cor ΔE calculada pela raiz quadrada da soma das diferenças ao quadrado das coordenadas L, a e b.

Para análise do ganho obtido com a redução do tempo de moagem, foi calculada a redução de consumo de energia elétrica em um moinho. E, analogamente, como outro meio de ganho, pela maior produtividade de barbotina, e, conseqüentemente, de peças de porcelanato técnico, o quanto de ganho de produção tem-se com mais descargas de moinho por mês. Esses resultados foram obtidos após o término do trabalho.

3. Resultados e Discussões

Foram analisados os resultados de resíduo de moagem para determinação do tempo de moagem buscando-se sua redução e, em seguida, comparando-se a distribuição granulométrica da barbotina e as propriedades técnicas dos corpos-de-prova, que devem se manter próximo ao padrão, além de uma análise de retorno financeiro com a redução do tempo de moagem.

3.1 Resíduo de moagem e distribuição granulométrica

Como resultado do acompanhamento do resíduo de moagem na produção, a Figura 3 demonstra as curvas comparativas de resíduo a partir das 4 h até o final da moagem para cada regime.

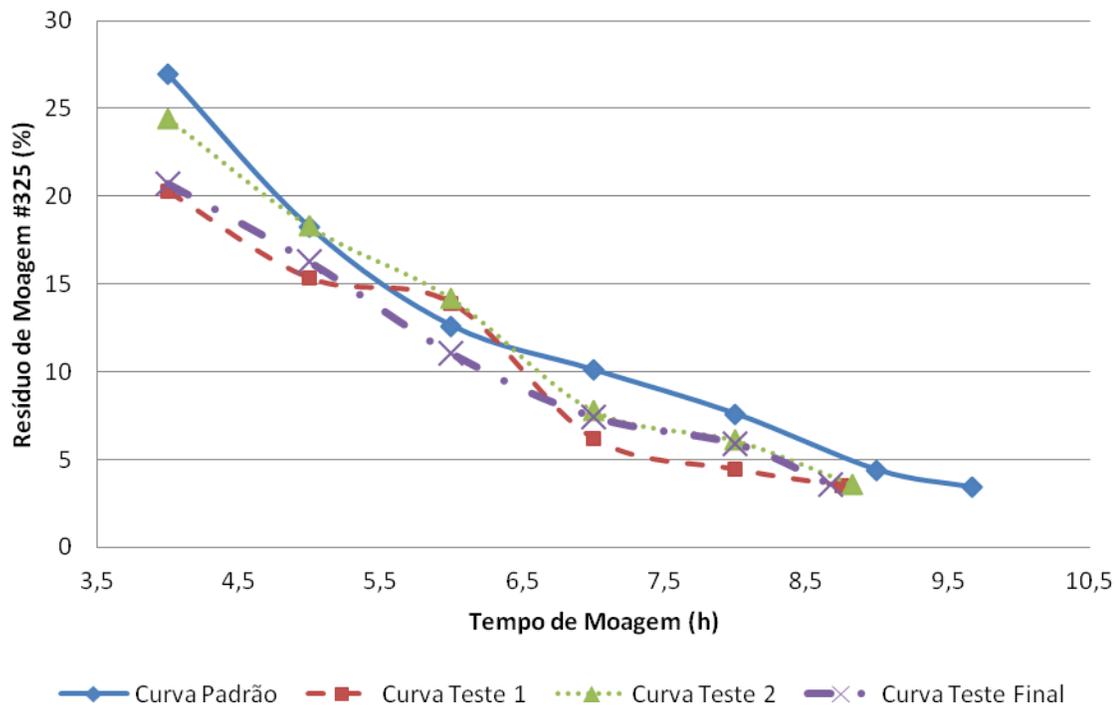


Figura 3 – Resíduo de moagem para as curvas padrão e testes de regime de moagem.
Fonte: AUTOR, 2013.

O final da moagem foi atingido quando se obteve um resíduo de moagem em peneira malha #325 mesh igual ou inferior a 3,5%. Assim, na Tabela 1 são apresentados os tempos de moagem para cada regime testado, de acordo com o tempo final da Figura 3. Pode-se observar que foram obtidas reduções do tempo de moagem de até 1 h, principalmente na curva teste final, considerada mais próxima da condição ideal otimizada.

Tabela 1 – Tempos de moagem para cada regime.

Regime de Moagem	Tempo de Moagem (h)
Curva Padrão	09:40
Curva Teste 1	08:45
Curva Teste 2	08:50
Curva Teste Final	08:40

Fonte: AUTOR, 2013.

Na Figura 4 são apresentados os resultados de distribuição granulométrica acumulativa, mostrando o desvio obtido em cada condição testada, curvas padrão e testes 1, 2 e final, no qual se obteve um resíduo de moagem adequado em diferentes tempos.

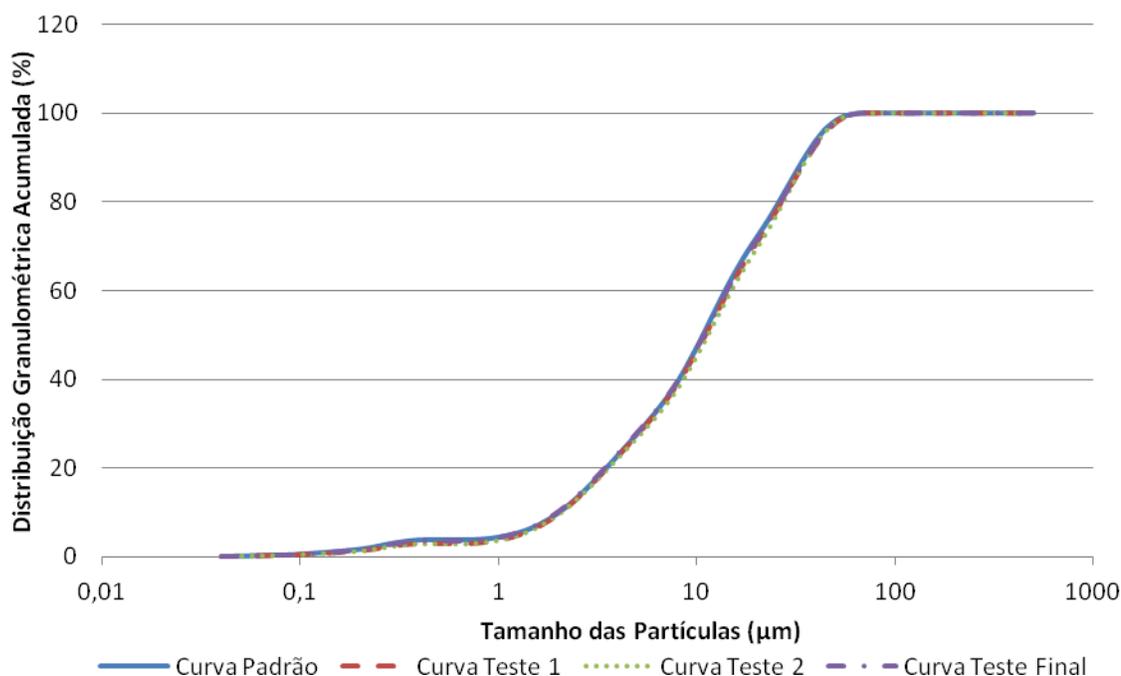


Figura 4 – Distribuição granulométrica das curvas padrão e testes de regime de moagem.

Fonte: AUTOR, 2013.

Observando-se o gráfico da Figura 4, as curvas apresentaram uma distribuição granulométrica similar, com uma correlação estatística de valores com o padrão entre 99,978% e 99,997%, sendo que a curva padrão necessitou em torno de 9h40min de moagem, enquanto que as curvas testes precisaram de menos de 9 h de moagem. Isto representa uma redução significativa de tempo de moagem para o processo em questão.

3.2 Caracterização do produto

Os resultados de caracterização física a seco e a queimado e colorimetria dos corpos-de-prova confeccionados em laboratório com as barbotinas nas condições de moagem da curva padrão e da curva teste final estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Caracterização dos corpos-de-prova das curvas padrão e teste final.

Amostra	Densidade Aparente a Seco (g/cm ³)	Perda ao Fogo (%)	Temperatura Máxima de Queima (°C)	Densidade Aparente a Queimado (g/cm ³)	Retração de Queima (%)	Absorção de Água (%)	L	a	b	ΔE
Curva Padrão	1,93	4,54	1180	2,324	6,83	0,41	76,64	2,95	10,55	
			1200	2,348	7,19	0,07	76,41	2,32	9,85	
			1220	2,348	7,41	0,02	76,75	1,81	9,72	
Curva Teste Final	1,93	4,38	1180	2,316	6,74	0,38	76,19	3,21	10,41	0,54
			1200	2,341	7,26	0,09	75,46	2,48	9,63	0,99
			1220	2,342	7,22	0,03	75,79	1,97	9,63	0,98

Fonte: AUTOR, 2013.

Como se pode observar nos resultados apresentados na Tabela 2, os corpos-de-prova da amostra moída na curva teste final apresentaram resultados similares aos da curva padrão. A densidade aparente a seco teve o mesmo resultado, tendo por consequência uma compactação por prensagem mantida no padrão. A perda ao fogo se manteve, pois não houve alteração na formulação de matérias-primas. Na colorimetria, pode-se observar uma diferença de cor ΔE nas diferentes temperaturas inferior a 1,00, sendo aceitável para liberação de massa no processo, considerando ainda que há mistura de cargas de diferentes moinhos em vascas e tanques para homogeneização da massa e que, portanto, a diferença será ainda menor. Sendo assim, para o produto final, as suas propriedades físicas se mantiveram as mesmas.

Com os dados da Tabela 2, foram obtidos os gráficos das Figuras 5, 6 e 7, de densidade aparente a queimado, absorção de água e retração de queima, respectivamente, das curvas padrão e teste final, por temperatura máxima de queima no gradiente.

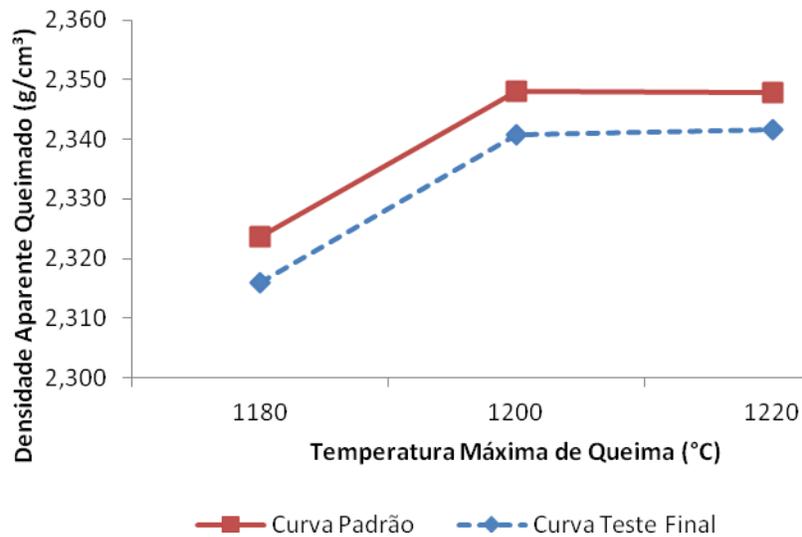


Figura 5 – Densidade aparente queimado por temperatura de queima.

Fonte: AUTOR, 2013.

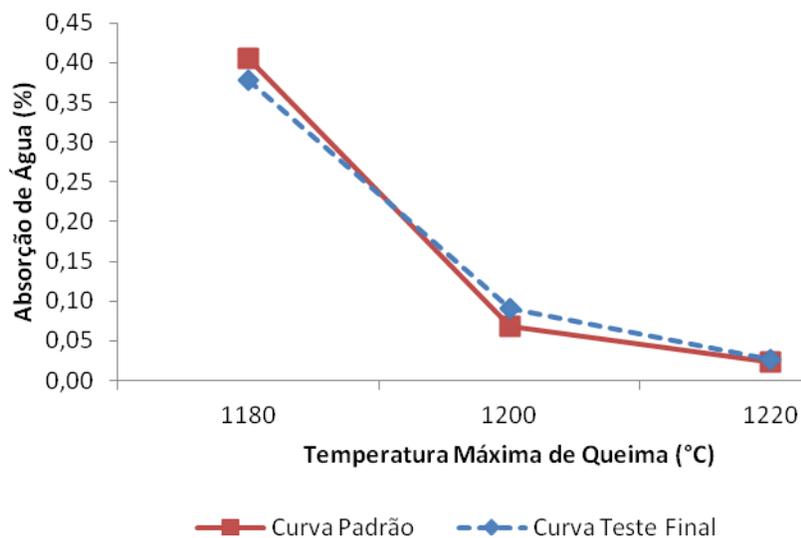


Figura 6 – Absorção de água por temperatura de queima.

Fonte: AUTOR, 2013.

Como se pode observar nas Figuras 5 e 6, a densidade aparente a queimado, assim como a absorção de água, demonstrou, na temperatura testada, mesmo comportamento de densificação com o aumento da temperatura, alcançando o valor máximo na temperatura próxima a 1210 °C, e com diferença entre padrão e teste inferior a 0,01 g/cm³, estando dentro dos limites de variação permitidos.

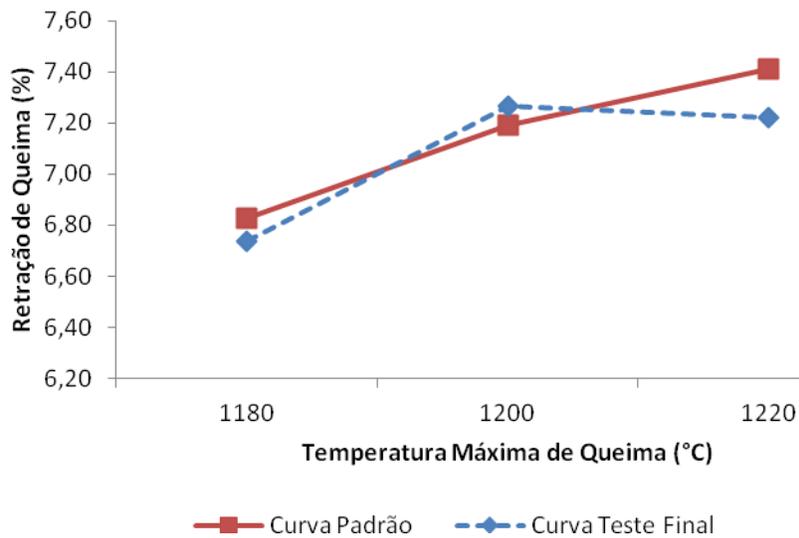


Figura 7 – Retração de queima por temperatura de queima.

Fonte: AUTOR, 2013.

Pode-se observar na Figura 7 que a retração de queima apresentou uma diferença máxima de 0,2%, correspondente a aproximadamente 1 mm numa peça cerâmica, o que consiste numa variação tolerável para o processo cujos produtos são retificados.

3.3 Ganho econômico-financeiro

Com os resultados obtidos de redução de aproximadamente 1 h de moagem, ou seja, 2 h/dia, pode-se determinar o retorno obtido.

Considerando o tempo ganho como utilizado para paradas e manutenção preventiva ou corretiva dos moinhos, necessárias para o processo produtivo, pode-se determinar o retorno com base na redução do consumo de energia elétrica.

Calculando o retorno energético a partir do consumo de energia para a potência do moinho de 26.000 L e o custo médio de energia elétrica, obteve-se uma redução energética de 11,1% para um moinho por mês.

Se for considerado o ganho em produtividade com a redução do tempo de moagem, tendo-se mais descargas, maior volume de barbotina e mais peças produzidas por mês, levou-se em consideração a carga seca de material do moinho, o peso por área e o custo médio de produção. Assim, pelo ganho de uma descarga a cada 6 dias, totalizando 5 por mês, produzindo mais quantidade de massa seca e metros quadrados de peças produzidas, obtém-se um ganho financeiro para um moinho de 1,2% na margem de contribuição da empresa.

4. Considerações Finais

Pode-se concluir que foi possível minimizar o tempo de moagem de uma formulação de porcelanato técnico em até 1 h, alterando-se o regime de velocidade de rotação ao longo do período de moagem.

Os resultados foram todos obtidos em moinho industrial, onde as condições de moagem como distribuição de diâmetro de bolas, quantidade de bolas, tipo de revestimento, entre outras variáveis, são padrão do processo industrial, o que comprova a confiabilidade dos resultados.

A distribuição granulométrica das partículas e as características físicas das peças foram mantidas dentro dos padrões de processo, garantindo a qualidade do produto final.

O ganho obtido com a otimização do regime de moagem pode ser verificado no maior tempo disponível para paradas e manutenção, com redução no consumo de energia elétrica, ou como em ganho de produtividade de peças de porcelanato técnico.

Referências Bibliográficas

ANFACER. **Cerâmica no Brasil**. Disponível em: <<http://www.anfacer.org.br>>. Acesso em: 20 mar. 2013

BARBA, A. BELTRÁN, V. FELÍU, C. GARCIA J. GINÉS, F. SÁNCHEZ, E. SANZ, V. **Materias primas para la fabricacion de soportes de baldosas cerâmicas**. Castellón: Instituto de Tecnologia Cerâmica, 2002, 292 p.

BOSA, Aline. FERRO, André Silvestri. WANDERLIND, Augusto. PASINI, Djeisa. PATRÍCIO, Marcelo Casagrande. TASSI, Reginaldo. MODESTO, Cláudio de Oliveira. Influência do resíduo in natura das matérias-primas, carga de bolas e resíduo final no tempo de moagem via úmida em moinho de bolas. **Revista Cerâmica Industrial**, v. 12, n. 6, nov./dez. 2007, 5 p.

DAROLT, Radamez Daros. **Influência da distribuição do tamanho de partículas sobre o efeito piropástico em massa de porcelanato técnico**. TCC de graduação: UNESC, 2009, 100 p.

NANDI, V. S. MONTEDO, O. R. K. Otimização do processo de moagem de engobes cerâmicos para produção de revestimento. **Revista Cerâmica Industrial**, v. 14, n. 4, jul./ago. 2009.