



UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE

Curso de Tecnologia em Cerâmica

Trabalho de Conclusão de Curso



ESTUDO da eficiência de moagem de matérias-primas cerâmicas em função do tipo do elemento moedor

Filipe José de Souza

Gilson Bez Fontana Menegali¹

Resumo: Este estudo teve como objetivo diminuir o tempo de moagem das matérias-primas cerâmicas. Este tempo é relativamente elevado, o que interfere diretamente na produtividade das unidades fabris. Atualmente, as empresas cerâmicas buscam aumentar a sua produção ao menor custo possível, deste modo este estudo pretende aumentar a produtividade nas indústrias cerâmicas em função da diminuição do tempo de moagem, substituindo os corpos moedores de alta alumina por aço. Podendo assim proporcionar uma moagem mais rápida em função da maior densidade deste elemento moedor, resultando assim em um aumento na produtividade do setor de preparação de massa. Para a moagem de massa escura a contaminação gerada pelo desgaste das bolas pode ser perfeitamente incorporada ao produto ou retirada por processo magnético sem afetar a cor de queima do produto, estes testes foram realizados no laboratório de cerâmica da UNESC.

Palavras-chave: Moagem, elementos moedores, aço, alumina, moinho excêntrico, contaminação, ferro.

1 Introdução

Nas empresas cerâmicas são utilizados dois tipos de moagem, a moagem por via seca e a moagem por via úmida. Na via úmida o equipamento mais utilizado é o moinho de bolas, que serve para diminuir o tamanho da partícula da matéria a ser moída.

Segundo Ribeiro e Abrantes (2001, p.7):

moinhos são constituídos por um cilindro oco, de metal, com um eixo na posição horizontal sobre o qual é imprimido um movimento de rotação (Figura 1). No seu interior, forrado com um material duro ou com borracha, rolam os corpos moedores em conjunto com o material a ser moído.

A representação de um moinho de bolas descontínuo é apresentada na Figura 1:

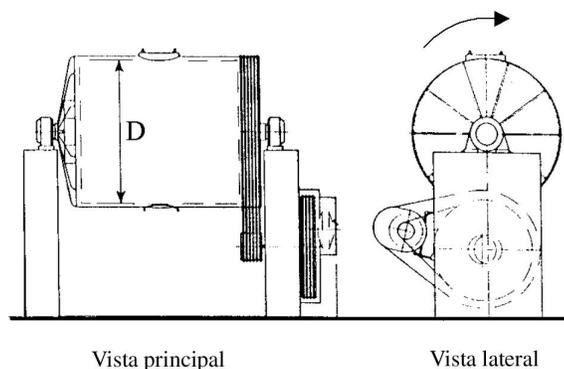


Figura 1: Moinho de bolas descontínuo
Fonte: Ribeiro e Abrantes (2001).

Segundo Cechinel (2002, p.13), os revestimentos dos moinhos de silicato de magnésio, alumina-sílica e alumina sinterizada têm um desgaste praticamente nulo pois as suas durezas vão de 6 a 9 na escala mohs.

A moagem com moinho de bolas demanda um longo tempo, diminuindo, assim, a produtividade de cada equipamento.

Nos moinhos são utilizados corpos moedores, elementos de elevada dureza que têm por objetivo a fragmentação e cisalhamento dos materiais a serem moídos.

Os corpos moedores mais utilizados em cerâmica de revestimento são o sílex e a alta alumina, para a moagem da massa, e a alta alumina para a moagem de pigmentos e vidrados cerâmicos.

De acordo com Bosa et al. (2007, p.32), a distribuição de bolas dentro do moinho influencia na moagem, com o tipo de distribuição das bolas no moinho pode se ter vários valores para o volume aparente de bolas, fator de empacotamento e desgaste das bolas do moinho que influenciam no rendimento deste processo. Uma forma de obter uma eficiência na moagem é utilizar de 35% a 55% do volume do moinho em elementos moedores.

Desta forma, percebe-se que se fosse utilizado como corpo moedor um material com maior densidade, seria então possível diminuir o tempo necessário para a moagem.

O uso de aço temperado ou ferro fundido, ligas que contêm basicamente ferro em sua composição e assim apresentam quase o dobro da densidade da alta alumina, pode

reduzir muito o tempo necessário para a moagem, porém causando problemas no processamento cerâmico, pois o ferro contamina a massa cerâmica. Entretanto, se a moagem com esferas de ferro fundido ou aço for utilizada para produtos de monoqueima como grés e porcelânicos vidrados, a contaminação não seria mais um problema tão crítico.

Mineradoras que extraem algumas matérias-primas, como feldspatos, utilizam-se moinho de bolas em aço para moer o material.

De acordo com Xuanshi Machinery (2010, p.1)

o moinho de bolas serve para triturar o material a ser moído, e utiliza força centrífuga, sendo que as esferas de aço sobem a certa altura na parede interna do moinho que gira pela ação de forças inerciais e caem sobre a matéria-prima no interior do moinho, causando assim a moagem da matéria-prima.

Segundo Chemstar Enterprises (2010, p. 121), "as esferas do moinho são de aço forjado e têm diâmetro entre 20 e 150 mm, sendo adequadas para ruptura e erosão das matérias-primas, sendo utilizadas também para moer pós muito finos."

Conforme Godoy (2010), as bolas de aço têm o dobro da densidade das bolas de alumina e isso aumenta as energias das colisões dentro do moinho e, com isso, diminui para menos da metade o tempo de moagem de uma barbotina dentro do moinho. O aço tem um preço inferior ao da alumina, e existem aços de altíssima dureza e que tem um desgaste em gramas baixo, que é consumido pela barbotina, e com isso pode se reduzir o custo da moagem e aumentar a produção. As esferas de aço temperado apresentam um desgaste de 50 a 90 g por tonelada de massa; estes teores só afetariam bases de cor branca.

Desta forma, o estudo objetiva reduzir o tempo de moagem das matérias-primas cerâmica.

2. Materiais e Métodos

Este trabalho foi desenvolvido no laboratório de cerâmica da UNESC. Foram feitas moagens padrão para os dois tipos de corpos moedores.

Para definir o volume de bolas do moinho excêntrico foi tomado como base o enchimento do mesmo até o limite da boca com o moinho na vertical, evitando o contato das bolas com a vedação do mesmo.

Obteve-se, desta forma, uma massa de 619,5 g de bolas de aço com a quantidade de 41 bolas de diâmetro entre 15 mm e 16 mm.

Foram selecionadas 41 bolas de alta alumina com diâmetro entre 15 mm e 16 mm, com massa de 297,7 g.

A matéria-prima a ser moída foi areia de praia, por ser de granulometria uniforme e baixa contaminação de ferro e por estar presente na maioria dos materiais cerâmicos. Foi selecionada através de peneira passante abertura em 0,297 mm e retida na abertura em 0,212 mm.

Foram efetuadas moagens no moinho excêntrico (Servitech, CT242), nas mesmas condições com bolas de alumina e bolas de aço.

Foram colocados em cada moinho 150 g de areia e 100 g de água. Os tempos foram definidos em 5, 10, 15 e 20 min para cada moagem.

De cada uma das moagens foram retiradas amostras para a determinação da distribuição do tamanho de partícula (Cilas, 1064L).

Na última moagem, a mais longa, foi feita a pesagem em uma balança analítica (Bel Engineering, mark210A) com resolução 0,1 mg, dos elementos moedores, de aço e de alumina, antes e depois das moagens para averiguar se houve muito desgaste dos corpos moedores.

Foi realizado o teste de microdureza vickers (Otto Wolpat-Weke, M-Testor) com uma amostra da bola de aço. Foi lixada na lixadeira e politriz (Fortel, Plf), nas lixas 80,120, 220, 320, 400, 500, 600, 800 e 1200. Logo após polida com alumina na lixadeira e politriz. Após, enviada para o teste.

Foram feitas as densidades com o empuxo de mercúrio das bolas de alumina e de aço, logo abaixo segue a fórmula do cálculo da densidade.

$$\text{Cálculo: } V = \frac{M}{D}$$

V= Volume
M= Massa
D= Densidade

Foi feito um ensaio de determinação do teor de imantáveis para averiguar o teor de ferro que foi disperso na moagem. Foram colocadas 250 g de areia moída no moinho em um pote com 2 L de água. Logo depois colocado em um agitador com um ímã de potência de 3000 Gauss, o ímã foi fixado no pote para entrar em contato com a areia suspensa. Foram definidos quatro tempos de 10 min. A cada 10 min, era retirado o ímã e extraiu-se dele, com um borrifador de água, o ferro que nele ficou retido, e esse material que foi retido no ímã, foi lavado com água até retirar toda a areia que estava com o ferro. Logo após, foi colocado na estufa para secar e depois pesou-se o ferro que foi retido.

De cada uma das moagens foram retiradas amostras para a determinação da distribuição do tamanho de partícula (Cilas, 1064L).

3. Resultados e Discussões

Os valores de massa obtidos antes e depois da moagem de 20 min revelam um desgaste de 2,1361 g das bolas de aço e de 1,4251 g das bolas de alumina. Transformado em volume equivalente, são 0,26 cm³ de bola de aço e 0,38 cm³ de bola de alumina. Em relação à massa moedora, o total foi de 615,83 g de aço com desgaste de 2,14 g, que equivalem a 0,35% de perda. Em relação à massa moedora total, essa foi de 298,27 g de alumina, com desgaste de 1,43 g, equivalente a 0,48% de perda em alumina.

No teste de micro dureza vickers as esferas de aço apresentaram uma dureza 8,08 GPa.

Segundo Moraes (2004, p.186), após ser queimado, o óxido de alumina tem uma dureza de 17,53 GPa.

A densidade dos elementos moedores é, depois da dureza, uma das características mais importantes. Como não se tinha as características das bolas de aço, foi realizado o teste de densidade, usando o mesmo método para os dois elementos. No caso, utilizou-se o empuxo de mercúrio para a determinação das duas densidades relatadas na Tabela 1.

Tabela 1. Densidade aparente

Amostras	massa(g)	Empuxo de Hg(g)	Densidade (g/cm ³)
Alumina	8,2	29,4	3,77
Aço	16,6	27,8	8,08

Fonte:Autor (2011).

Comprovou-se, desta forma, que a densidade do aço usado no experimento é mais que o dobro da densidade da alumina (1:2,14).

No teste de imantáveis, as matérias-primas que foram moídas com o aço apresentaram percentual mais alto do teor de ferro, que foi retido no ímã, depois de separado da contaminação com massa, segundo apresentado nas Tabelas 2 e 3, a seguir.

Tabela 2. Imantáveis Alumina

Amostras	% de ferro
Alumina 5 min.	0,10
Alumina 10 min.	0,11
Alumina 15 min.	0,18
Alumina 20 min.	0,24

Fonte: Autor(2011).

Tabela 3. Imantáveis Aço

Amostras	% de ferro
Aço 5 min	0,43
Aço 10 min	0,58
Aço 15 min	0,74
Aço 20 min	0,85

Fonte: Autor (2011).

Na primeira medida dos imantáveis, obteve-se valores elevados de material considerado como contaminação de ferro. Observando a metodologia aplicada, verificou-se que boa parte do material retido no ímã era de contaminação com o

material moído. Modificou-se a forma de retirada do ferro do ímã, passando primeiramente por imersão em água limpa e substituindo a mesma até obter-se um mínimo de turvamento. Desta forma, os valores retidos no ímã conferem com o desgaste medido na moagem de 20 min, feito em balança analítica.

Com estes resultados, pôde-se comparar com dados bibliográficos que indicam um desgaste de 0,08% para materiais construídos para esta finalidade. Portanto, o resultado obtido é cerca de 10 vezes maior. Esta diferença é atribuída ao uso de esferas de aço construídas para outras finalidades e como material a ser moído, 100% quartzo.

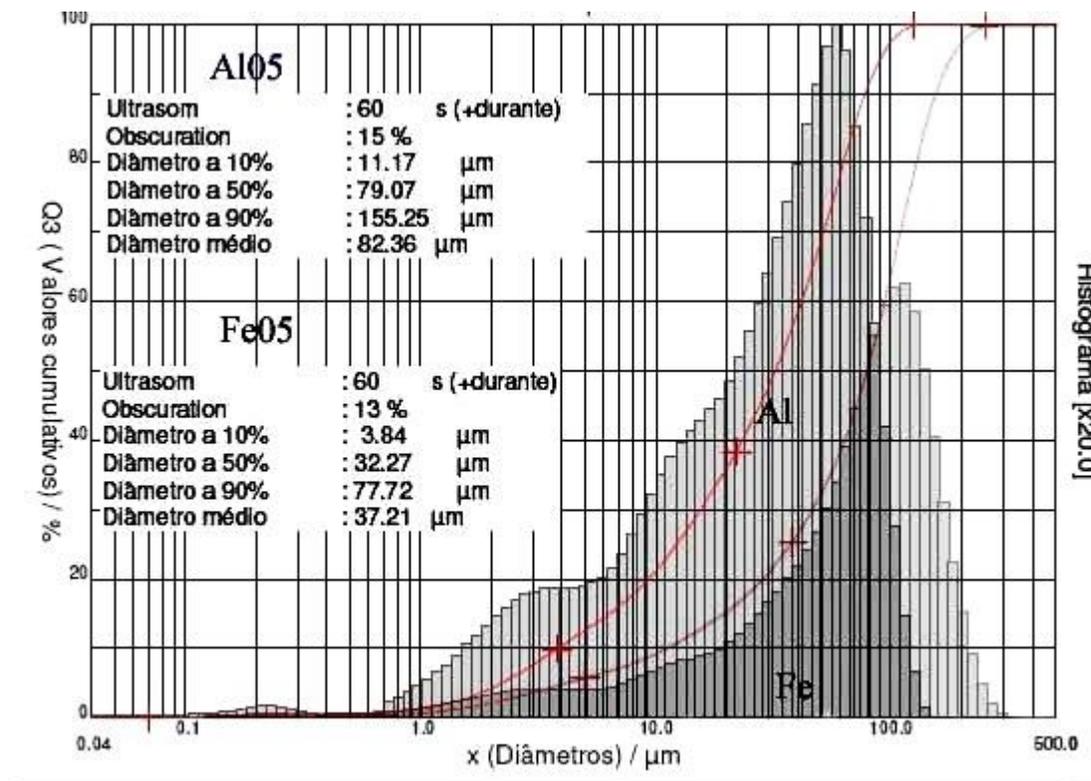


Figura 2: Distribuição de tamanho de partículas alumina e do aço moídos por 5 min.
Fonte: autor, 2011.

Na comparação dos primeiros cinco min. de moagem (Figura 2), nota-se que as bolas de alumina não conseguem eliminar todas as partículas próximas de 300 μm, enquanto as de aço deixam 100% abaixo de 150 μm. Ao mesmo tempo na porção mais fina também a eficiência das bolas de aço é maior. Cerca de 10% da amostra chega a um

diâmetro inferior a 4 μm , enquanto na alumina fica em torno 11 μm . De uma maneira geral observa-se que a diferença do diâmetro médio é significativa baixando de 82 μm com alumina para 37 μm com as bolas de aço, com uma relação de 1 para 2,2.

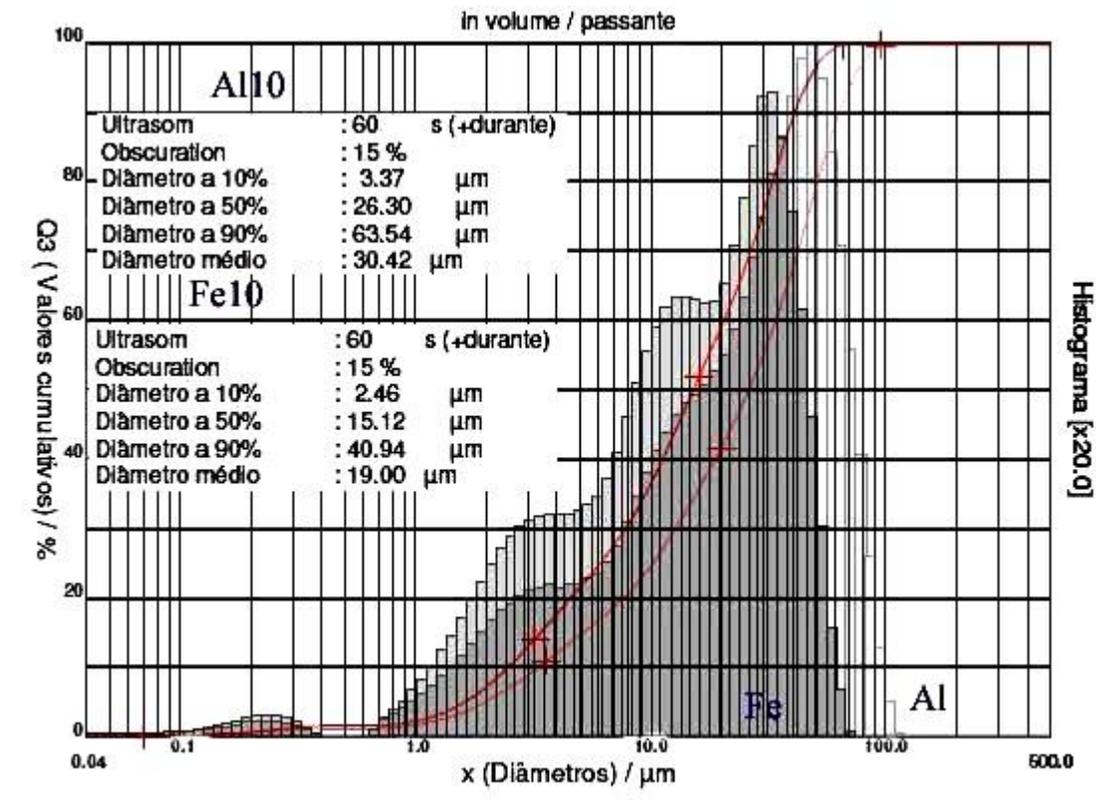


Figura 3: distribuição de tamanho de partícula de alumina e aço moídos por 10 min.
Fonte: autor, 2011.

Aos 10 min. de moagem (Figura 3), as bolas de alumina atingem o índice que as de aço tinham atingido aos 5 min. Isto comprova o dobro da eficiência nos primeiros 5 min das bolas de aço em relação às bolas de alumina. Na comparação direta aos 10 min a eficiência não se mantém, pois o diâmetro máximo cai para cerca de 70 μm com aço e aproximadamente 100 μm para alumina. O mesmo acontece para o diâmetro menor pois 10% está abaixo 3,37 μm na alumina enquanto 2,46 μm na de aço. Na comparação geral passamos de 30,42 μm de diâmetro médio na alumina, para 19,00 μm na de aço, trazendo a relação de 1:2,2 dos primeiros 5 min para 1:1,6 aos 10 min de moagem.

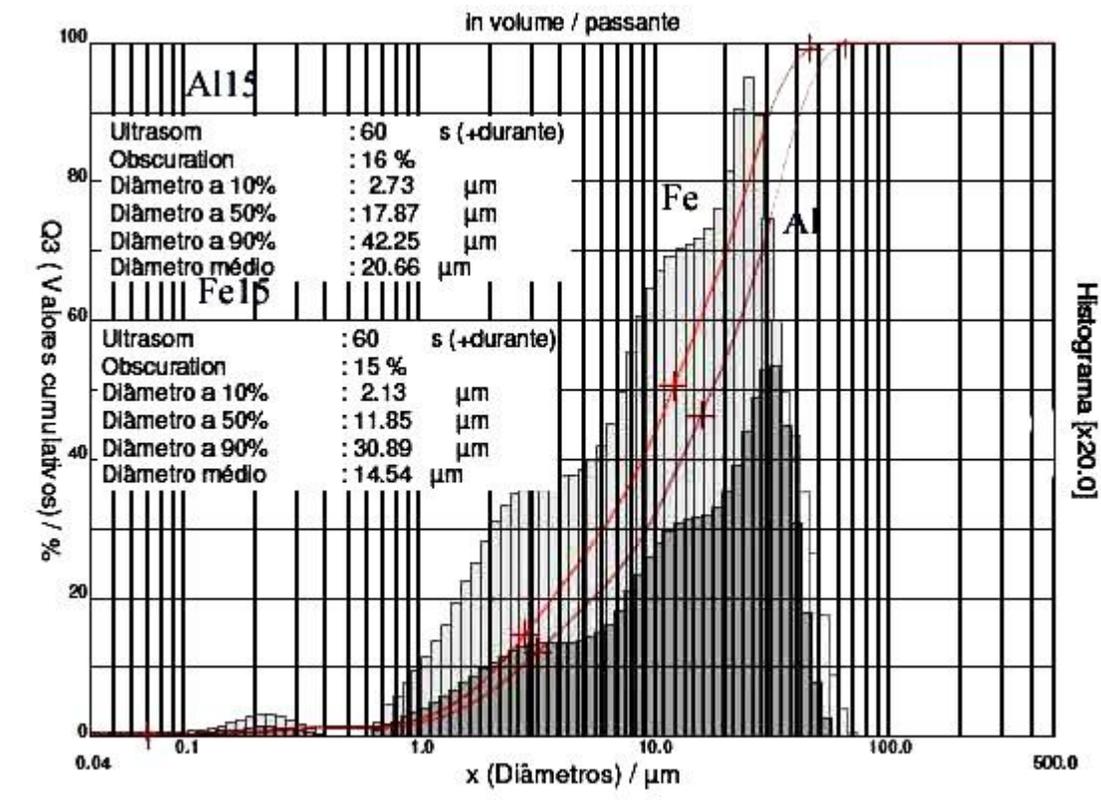


Figura 4: distribuição de tamanho de partícula de alumina e aço moídos por 15 min.
Fonte: Autor, 2011.

À medida em que o tempo de moagem aumenta, a diferença entre os dois tipos de materiais macinantes, diminui. Aos 15 min de moagem, o diâmetro máximo existente passa de 70 μm na alumina para cerca de 50 μm na de aço. Diminui, desta forma, a diferença existente no início da moagem. O mesmo acontece com os diâmetros menores, nos quais a diferença começa a ficar cada vez menor. Na comparação dos diâmetros médios, passou-se para uma relação entre moagem com bolas de aço e bolas de alumina para 1:1,4.

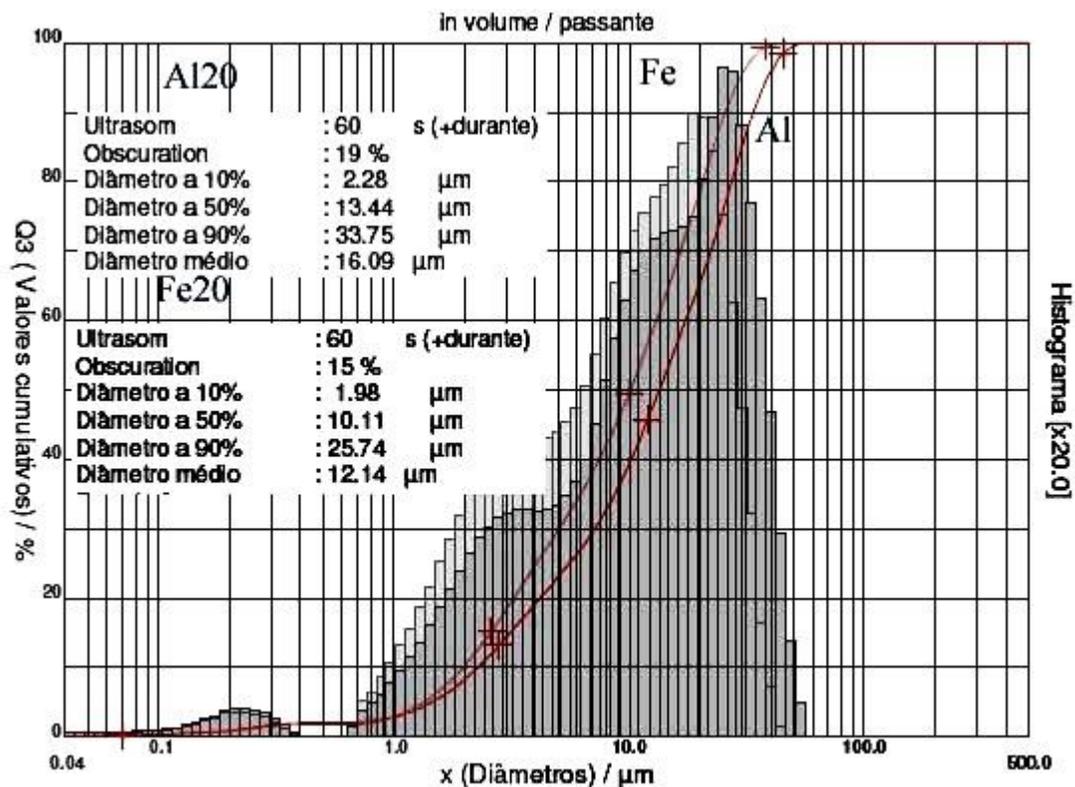


Figura 5: distribuição de tamanho de partícula de alumina e aço moídos por 20 min.
Fonte: Autor, 2011.

Observando a Figura 5, nota-se que a tendência de aproximação entre os dois sistemas continua. O diâmetro máximo de ambos já está próximo de 50 µm. Na porção fina 10% está abaixo de 2,28 µm na alumina e 1,98 µm na de aço. A relação dos diâmetros médios está em 1:1,3.

Tabela 4. Diâmetro médio

Tempo (minutos)	Alumina (µm)	Aço (µm)
0	250	250
5	82,36	37,21
10	30,42	19,00
15	20,66	14,54
20	16,09	12,14

Fonte: Autor (2011).

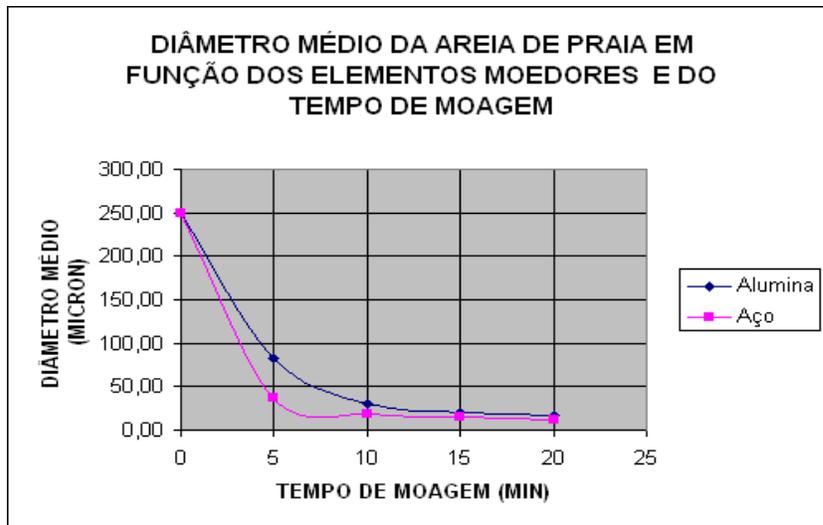


Figura 6: Gráfico do diâmetro médio da areia de praia em função dos elementos moedores e do tempo de moagem

Fonte: Autor, 2011.

Como mostra os gráficos, pode-se ver que houve uma diferença significativa entre a moagem com bolas aço e a de alumina nos 5 primeiros min, a moagem com o aço reduz pela metade o tempo de moagem, mas já com os outros tempos, não se teve tanta eficiência. Um dos motivos disto ter acontecido foi o uso de bolas dos mesmos diâmetros.

As esferas de aço usadas para fazer este teste foram de aço carbono, esferas de rolamento. Com o teste de imantáveis foi possível retirar a quantidade de ferro esperado. Com esse resultado, pode-se produzir uma massa para um material esmaltado, pois se forem trocadas as esferas em um processo de uma fábrica, pode retirar o ferro da massa cerâmica utilizando ímãs. Estes ímãs podem ser colocados na saída da peneira que vem das vascas, para conseguir um melhor resultado, pois se for colocado depois que já foi formado o pó atomizado, o ferro vai estar junto com o pó. Dessa forma, quando passar no ímã vai sair o grânulo que está com o ferro, mas podem também ser colocados ímãs na correia transportadora que carrega o pó

atomizado dos atomizadores para os silos, e também no pó atomizado antes dele ser prensado, e em vários outros locais no processo cerâmico.

4. Considerações Finais

Com o resultado do teste de dureza vickers, pôde-se ver que a alumina tem uma dureza maior que a do aço, praticamente o dobro, então, ao se conseguir um tratamento adequado para elevar a dureza do aço, é possível obter-se melhorias significativas em todos os resultados obtidos neste trabalho.

Foi possível constatar que os resultados de desgaste estão dez vezes superiores aos indicados na literatura, o que demonstra a possibilidade de resultados ainda melhores quanto ao desgaste dos elementos moedores e, por consequência, a diminuição da contaminação com ferro. O uso de elementos moedores construídos especificamente para este fim pode trazer uma melhoria no fator contaminação e desgaste.

A eficiência da moagem nos primeiros 5 min é proporcional à diferença de densidade. A densidade do aço é o dobro da densidade da alumina e o diâmetro médio entre a moagem com alumina e aço é também o dobro. A moagem com alumina atinge, aos 10 min o tamanho médio de partícula alcançado aos 5 min com esferas de aço.

A partir do segundo tempo de moagem em diante, as diferenças começam a cair chegando aos 20 min com similaridade de comportamento em termos de distribuição de tamanho de partículas.

Este resultado era esperado, pois usou-se apenas um tamanho de bola 15 a 16 mm, o que leva à menor eficiência quando o tamanho da partícula a ser moída fica menor.

Acredita-se que usando uma distribuição de tamanho de bolas adequada pode-se manter a diferença obtida nos 5 primeiros min, nos demais tempos.

Quanto à contaminação com ferro, que é considerado problema para as massas cerâmicas, 0,8% de contaminação não chega a ser comprometedora, principalmente para massas de cor escura.

Assim, o objetivo foi alcançado pois era comprovar a possibilidade de uso do aço na moagem cerâmica, aumentando a eficiência de moagem. Sugere-se a continuação do trabalho com uso de bolas adequadas em dureza e em distribuição de tamanhos. Sugere-se, ainda, o uso de bolas de aço para moagem de outras massas ou matérias-primas, como piritas, resíduos de fundição, etc.

5. Referências Bibliográficas

BOSA, A. et al. Influência do resíduo in natura das matérias-primas, carga de bolas e resíduo final no tempo de moagem via úmida em moinho de bolas. São Carlos: **Cerâmica Industrial**, v.12, n.6, 2007.

CHEMSTAR ENTERPRISES CO.. LTD (China). **Esferas de aço forjadas para moinho de esferas**. Disponível em: <portuguese.alibaba.com/product-gs/forged-steel-balls-for-ball-mill-284667947.html>. Acesso em: 2 out. 2010.

CECHINEL, A. **Otimização da moagem no processo de monoqueima**. 2002. Trabalho de conclusão de curso (tecnologia em cerâmica) Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.

GODOY, Marcial - Kromu Corpos. **Eficiência e Economia na Moagem de Barbotina**. Disponível em: <http://www.abceram.org.br/51cbc/paginas/51cbc_03_palestras.htm>. Acesso em: 6 out. 2010.

MORAES, M.C.C.S.B. **Microestrutura e propriedades mecânicas de compósitos alumina-zirconio para próteses dentárias**. Rio de Janeiro: Dissertação (Doutorado em ciência dos materiais), Instituto Militar de Engenharia, 2004. 186p.

RIBEIRO, M. J. P. M.; ABRANTES, J. C. C. Moagem em moinho de bolas: Estudo de algumas variáveis e otimização energética do processo. Moagem, moinho de bolas, otimização de processo. São Carlos: **Cerâmica Industrial**, v.6, n.2, 2001.

XUANSHI MACHINERY CO. LTD. (China). **Moinho de Bolas**. Disponível em: <<http://xscrusher.com.pt/3d-ball-mill.html>>. Acesso em: 6 set. 2010.