

Influência da distribuição granulométrica de argilas para via seca sobre o rendimento de moagem em moinho de martelos

(Influence of granule size distribution of clays for dry route on milling yield in the hammer mill)

H. J. Alves, R. T. Zauberger, A. O. Boschi

Laboratório de Revestimentos Cerâmicos, Departamento de Engenharia de Materiais - DEMa

Universidade Federal de S. Carlos - UFSCar

Rod. Washington Luiz, Km 235, C.P. 676, S. Carlos, SP 13574-970

helquimica@yahoo.com.br

Resumo

Um método para avaliar a dureza e o rendimento na moagem de matérias-primas para a fabricação de revestimentos cerâmicos por via seca foi o objetivo deste trabalho. A avaliação do potencial de uso de uma dada matéria-prima argilosa para a indústria de revestimentos cerâmicos por via seca não costuma contemplar características como a dureza e o rendimento na moagem, mas estas características afetam a durabilidade e o desempenho dos moinhos de martelos e pendulares nas indústrias, além da produtividade do processo de fabricação. Seis amostras industriais foram caracterizadas quanto à distribuição granulométrica antes e após a moagem em moinho de martelos de laboratório, sob duas condições iniciais de distribuição. As avaliações consideraram as alterações nos coeficientes de distribuição n e nos teores de material mais fino do que malha 45 ($355 \mu\text{m}$). A metodologia proposta mostrou-se útil para caracterizar as matérias-primas quanto à dureza e o rendimento na moagem.

Palavras-chave: distribuição granulométrica, moinho de martelos, dureza de argilas, rendimento de moagem, coeficiente de distribuição.

Abstract

A method to evaluate the hardness and milling yield of raw materials to dry route ceramic tiles industry was the goal of this work. Evaluation of the potential of a clayish raw material to dry route ceramic tiles industry does not cover characteristics such as hardness and milling yield, but these characteristics also affect, besides durability and performance of hammer and pendular industrial mills, the productive process. Six industrial samples were characterized to grain size distribution before and after being milled in a laboratorial hammer mill, under two initial size distributions. The evaluations considered the changes in distribution coefficient modulus n and in the fractions smaller than sieve 45 ($355 \mu\text{m}$). Proposed methodology proved to be useful to characterize raw materials according to its hardness and milling yield.

Keywords: grain size distribution, hammer mill, hardness of clays, milling yield, distribution coefficient.

INTRODUÇÃO

A caracterização de uma argila visando ao estudo da viabilidade do uso desta como matéria-prima cerâmica para a produção de revestimentos cerâmicos por via seca é substancialmente diferente da caracterização de uma matéria-prima para a via úmida. As principais diferenças são relacionadas ao processo de moagem da via seca, que não proporciona uma intimidade de mistura tão eficiente quanto o da moagem por via úmida [1]. Assim, a argila a ser caracterizada deve, além de apresentar o desempenho esperado durante o processamento (ou seja, sua trabalhabilidade) e garantir a obtenção das propriedades desejadas no produto acabado, apresentar características físicas, químicas e mineralógicas similares às das outras matérias-primas que

constituirão a massa cerâmica formulada. A necessidade de similaridade entre as matérias-primas que constituem uma formulação de via seca decorre das limitações do processo de moagem e mistura, feito em três etapas: trabalho de pátio, moagem em moinho de martelos da massa e moagem em moinho pendular da fração mais dura que não conseguiu ser moída pelo moinho de martelos. Como prática corriqueira na extração das matérias-primas para as indústrias de revestimentos do Pólo Cerâmico de Santa Gertrudes, S.P., que produz quase totalmente por via seca e é responsável por 70% da produção nacional de revestimentos, tem-se o panorama a seguir.

As “frentes” de extração das argilas são cortes verticais e horizontais em morros da Formação Corumbataí, uma formação geológica composta por sedimentos marinhos de

280 milhões de anos [2], com predominância dos minerais argilas ílticas-montmoriloníticas, quartzo, feldspatos, calcários e hematita, além de contaminantes. As frentes extraem fácies (ou “bancadas”) com espessuras entre até menos de um metro (casos dos *bone beds*) a até mais de 20 m (bancadas argilosas). As bancadas são dispostas em pátios no método das “mil folhas” segundo uma formulação definida ou pelo profissional conhecido como argileiro ou, em poucos casos, pelos técnicos de laboratório, sendo esta a única etapa do processo produtivo na qual podem ser feitas interferências na formulação. A etapa é extremamente empírica e, caso origine uma massa distinta da utilizada na produção, de maneira que o desempenho nas diversas operações do processamento seja inadequado, os ajustes possíveis de serem feitos serão somente aqueles nos parâmetros operacionais dos equipamentos, e não na formulação da massa.

As principais características analisadas na caracterização de uma matéria-prima para avaliar sua viabilidade de uso nos processos de via seca envolvem a trabalhabilidade da matéria-prima e o desempenho do produto queimado. Os controles de características físicas, químicas e reológicas, não são feitos nas massas de produção, motivo pelo qual também não costumam ser feitos nas matérias-primas. O interesse na caracterização concentra-se nos ensaios tecnológicos a seguir, que visam a identificar a sensibilidade da matéria-prima quando submetida a alterações nas variáveis de processo: curva de compactação; resistência mecânica a verde e após secagem; curva de gresificação; resistência mecânica após queima; coeficiente de variação térmica linear (α); tendência à formação de coração negro; e expansão por umidade. Os ensaios citados são realizados por diversos laboratórios cerâmicos em indústrias e em universidades, e o trabalho em parceria tem possibilitado um contínuo aprendizado, sendo estes ensaios bastante eficazes na tarefa de identificar a viabilidade de uso de dada matéria-prima na via seca. Entretanto, devido a questionamentos feitos por técnicos cerâmicos destas indústrias e por pesquisadores das instituições de ensino, pesquisa e desenvolvimento, foi identificada a necessidade de se desenvolver uma metodologia para avaliar um parâmetro até então deixado em segundo plano: o desempenho na moagem.

A experiência dos profissionais envolvidos na extração das argilas da Formação Corumbataí e a prática laboratorial, devido a pouca literatura existente sobre o assunto, formaram o embasamento inicial deste trabalho. O motivo particular foi um conhecimento dos argileiros de que algumas argilas

extraídas de bancadas mais profundas apresentam fundência adequada, porém elevada dureza, ou seja, formulações com maiores teores destas argilas devem possibilitar o uso de temperaturas de queima menores, porém criarão um gargalo no processo produtivo devido à menor produtividade dos moinhos. Perguntas como “até quanto desta argila pode ser utilizada” ou “em quanto será prejudicada a moagem se for utilizado um maior teor desta argila” continuam sendo qualitativas e não quantitativas.

O experimento apresentado tem como objetivo auxiliar no desenvolvimento de uma metodologia para avaliar a dureza e o rendimento de moagem de argilas visando ao estudo da viabilidade do uso desta como matéria-prima cerâmica para a produção de revestimentos cerâmicos por via seca.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram selecionadas para este estudo cinco matérias-primas naturais argilosas, provenientes de distintas formações geológicas, e uma massa industrial do Pólo Cerâmico de Santa Gertrudes. Dentre as seis amostras, quatro são provenientes da formação Corumbataí, uma é da Região Nordeste do Brasil e a outra provém da Cordilheira dos Andes, Chile; a massa industrial foi utilizada como referencial de “bom rendimento de moagem” baseado no rendimento da moagem industrial, segundo o conhecimento empírico dos técnicos cerâmicos. Estas matérias-primas foram caracterizadas quanto às distribuições granulométricas por peneiramento a seco, antes e após a moagem por moinho de martelos. A codificação utilizada e a região de extração de cada amostra estão presentes na Tabela I.

Algumas características próprias dessas amostras merecem destaque: A apresenta um hábito laminar/esfoliar e um elevado teor de matéria orgânica; B é considerada industrialmente uma argila “dura”; C é considerada industrialmente uma argila “mole”; e B e F são friáveis. As seis amostras são, visualmente, homogêneas.

Inicialmente, as amostras encontravam-se na forma de “torrões” com dimensões variadas. O primeiro passo foi secá-las em estufa numa temperatura de 110 °C durante 24 h. Após a secagem, as mesmas foram destorroadas em um britador de mandíbulas com abertura de descarte de 2,5 cm, provocando a quebra dos “torrões” maiores. Em seguida, foi realizado o quarteamento das matérias-primas, de modo que a quantidade da amostra separada para as análises, cerca de 200 g, representasse efetivamente a amostra original. Novamente as matérias-primas foram secas em estufa a 110 °C por 24 h.

Tabela I - Codificação das matérias-primas e região de extração.

[Table I - Coding of raw materials and the extraction region.]

Matérias-primas	A	B*	C*	D**	E	F
Formação / Região	Nordeste	Corumbataí	Corumbataí	Corumbataí	Corumbataí	Andes

*B e C foram extraídas de uma mesma jazida, porém, representam bancadas distintas: B provém de uma bancada inferior e C de uma bancada superior. **D constitui uma massa padrão utilizada industrialmente (mistura de B, C e outras bancadas da mesma jazida).

Com o objetivo de extrair o maior número de informações sobre algumas características dessas amostras, que possam interferir nas avaliações da dureza e do rendimento de moagem, foram desenvolvidos dois métodos. O método 1 divide-se em duas etapas: na primeira, 150 g das matérias-primas brutas (MPB) secas, *in natura*, foram peneiradas utilizando um agitador mecânico de peneiras, durante o tempo de 10 min. O peneiramento foi realizado fazendo-se uso de uma série de peneiras, cuja seqüência de abertura das malhas seguiu uma série aproximada de raiz de dois: 20.000 μm , 17.000 μm , 9.500 μm , 6.300 μm , 4.750 μm , 3.350 μm , 2.000 μm , 1.000 μm , 710 μm , 500 μm , 355 μm , 250 μm , 180 μm , 125 μm , 90 μm , 63 μm e 45 μm . A razão de aspecto dos grânulos não foi considerada neste trabalho. Após o peneiramento, a massa retida em cada peneira foi pesada, sendo plotados gráficos da distribuição granulométrica inicial de cada matéria-prima (porcentagens de grânulos acumulados menores que X diâmetro esférico equivalente). Na segunda etapa, a mesma amostra submetida ao peneiramento realizado na primeira, foi moída em moinho de martelos e peneirada na série de peneiras com abertura igual ou menor que 2000 μm , devido ao material moído apresentar tamanho de grânulos inferior a 1440 μm (diâmetro da abertura da grade de descarte do moinho de martelos). Com estes resultados foram plotados os gráficos das distribuições granulométricas das matérias-primas moídas. O método 2 consistiu na padronização da curva de distribuição granulométrica das amostras antes da moagem. Para isso, de acordo com os resultados obtidos no método 1, foi selecionada uma curva de distribuição contínua de uma determinada amostra *in natura* (MPB), de modo que esta fosse reproduzida para todas as outras matérias-primas. Dessa forma, pôde-se padronizar a curva de distribuição granulométrica para as matérias-primas brutas. Estas foram desagregadas manualmente, pelo uso de um pistilo e uma cápsula de porcelana, o que possibilitou a geração das frações mássicas necessárias para cobrir toda a faixa de diâmetro de grãos solicitada pela distribuição padrão. Então, através da dosagem das frações necessárias para atenderem a distribuição padrão, formou-se uma amostra de 150 g (mesma quantidade utilizada no método 1). Em seguida, as matérias-primas foram secas em estufa (110 °C durante 24 h) e moídas em moinho de martelos. Após a moagem, as amostras passaram pelo mesmo procedimento descrito na segunda etapa do método 1: peneiramento utilizando uma série de peneiras de menor abertura, pesagem da massa retida nas peneiras e construção de gráficos de distribuição granulométrica.

O método 1 foi aplicado com o objetivo de avaliar a alteração causada pela moagem nas curvas de distribuição granulométrica, buscando conhecer o comportamento das matérias-primas utilizadas na via seca quando moídas em moinho de martelos. O método 2 foi aplicado visando avaliar o rendimento de moagem das matérias-primas brutas quando as mesmas apresentam distribuição de tamanho de grânulos iguais. Dessa forma, buscou-se confrontar os resultados obtidos de modo a correlacionar a dureza da matéria-prima

com o rendimento de moagem.

Considerando que a dureza é uma propriedade associada à integridade do material quando submetido a forças de deformação permanente [3], a compreensão dos fenômenos envolvendo o empacotamento das partículas, ou grânulos, é de grande importância para o estudo deste assunto. Segundo o modelo de empacotamento de partículas contínuo (aplicável também a grânulos) [4-6], o coeficiente de distribuição n (inclinação da curva de distribuição contínua) representa um empacotamento máximo quando o seu valor é igual a 0,37. Na prática industrial, uma moagem que origine uma massa com uma distribuição granulométrica cujo coeficiente se aproxime de 0,37 tende a apresentar melhor desempenho quanto a segregação, fluidez e densidades aparentes de enchimento e após prensagem. Assim, também foram calculados os valores de n para cada curva de distribuição granulométrica obtida no método 2. A equação A [4] que relaciona o coeficiente n com a distribuição de tamanhos de partículas (ou grânulos) é dada por:

$$\text{CPFT}/100 = (D^n - D_s^n)/(D_L^n - D_s^n) \quad (\text{A})$$

na qual CPFT = porcentagem acumulada abaixo de D , D = tamanho de partícula, D_L = tamanho da maior partícula, D_s = tamanho da menor partícula, e n = coeficiente de distribuição.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As amostras utilizadas no trabalho são apresentadas na Fig. 1. As distribuições granulométricas das matérias-primas antes e após a moagem são representadas na forma de histogramas nas Figs. 2 e 3 e na forma de distribuição acumulada na Fig. 4 (referentes ao método 1).

A Fig. 2 mostra que a maior parte dos grânulos que compõem as matérias-primas naturais utilizadas neste trabalho apresenta diâmetro médio na faixa 4750–17000 μm . Comparando a Fig. 2 com a Fig. 3, nota-se que a moagem

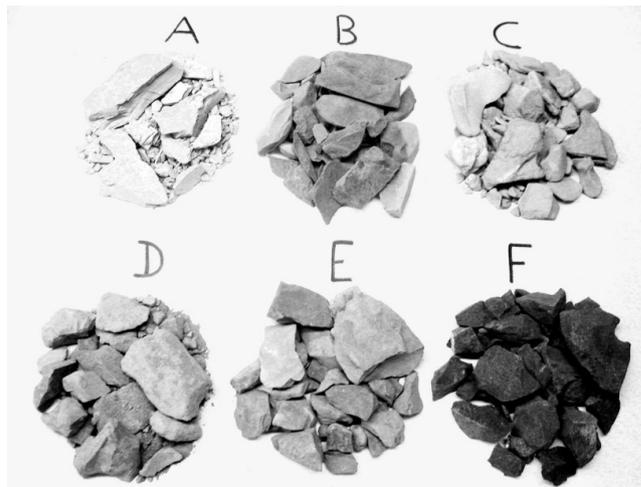


Figura 1: Fotografia das matérias-primas brutas (MPB).
[Figure 1: Photo of crushed raw materials.]

provocou um aumento acentuado no teor de grânulos com diâmetro abaixo de $355 \mu\text{m}$, atuando principalmente sobre a faixa de grânulos com diâmetro entre 210 e $355 \mu\text{m}$, 89 e $178 \mu\text{m}$ e, no caso de algumas matérias-primas, abaixo de $44 \mu\text{m}$. A faixa de diâmetro abaixo de $355 \mu\text{m}$ é de significativa relevância tecnológica, pois esta é a abertura convencional das grades na descarga dos moinhos de martelos do Pólo de Sta. Gertrudes, ou seja, somente os grânulos com diâmetro abaixo de $355 \mu\text{m}$ alimentarão as prensas.

Na Fig. 4 estão as curvas de distribuição granulométrica das amostras antes e após a moagem (método 1). É possível notar que a moagem altera totalmente o comportamento dessas curvas em relação às MPB; em geral, a variação na inclinação das curvas é diferente para cada amostra, revelando assim a diferença de comportamento quando submetidas à moagem. Comparando-se os valores de D_{50} das amostras antes e após a moagem pode-se observar comportamentos distintos; a amostra F, por exemplo, apresenta o maior D_{50}

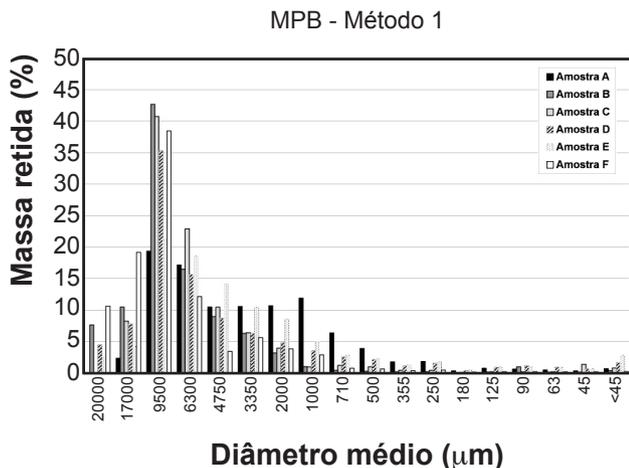


Figura 2: Histogramas das distribuições granulométricas das amostras brutas (MPB) – Método 1.

[Figure 2: Grain size distributions (histograms) of crushed raw materials – Method 1.]

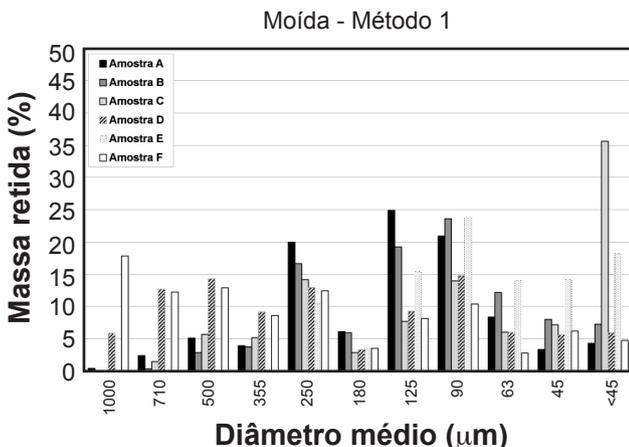


Figura 3: Histogramas das distribuições granulométricas das amostras moídas – Método 1.

[Figure 3: Grain size distributions (histograms) of milled raw materials – Method 1.]

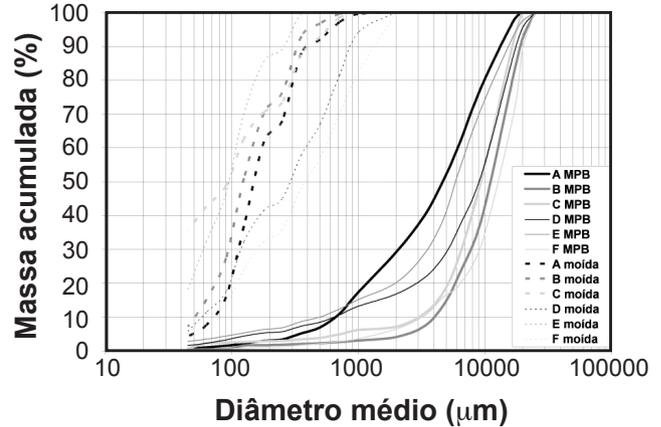


Figura 4: Distribuição granulométrica acumulada das amostras brutas (MPB) e moídas – Método 1.

[Figure 4: Cumulative grain size distributions of crushed and milled raw materials – Method 1.]

tanto antes como após a moagem, enquanto que a amostra C apresentava o terceiro maior D_{50} e originou o menor D_{50} após a moagem. Com base nos resultados apresentados na Fig. 4 (método 1), foi escolhida a amostra C para servir de padrão, no que diz respeito à distribuição granulométrica das MPB (método 2). A Fig. 5 mostra a curva de distribuição granulométrica padrão e ainda as curvas de distribuição granulométrica das amostras moídas após a padronização. Como todas as amostras foram moídas sob mesmas condições de tamanho de grânulos, o valor do rendimento de moagem obtido para cada uma indica diretamente qual (is) delas mói (em) melhor. Estes valores foram obtidos considerando o percentual em massa menor que a peneira com abertura de $355 \mu\text{m}$, presente na amostra antes e após a moagem, conforme pode ser visto na Tabela II. Assim, quanto maior o valor obtido, maior será o rendimento.

Pode-se observar na Tabela II que o maior rendimento de moagem obtido foi o da amostra C. Também nota-se que a moagem provocou a diminuição do valor de n das matérias-primas, devido a uma mudança na inclinação das curvas

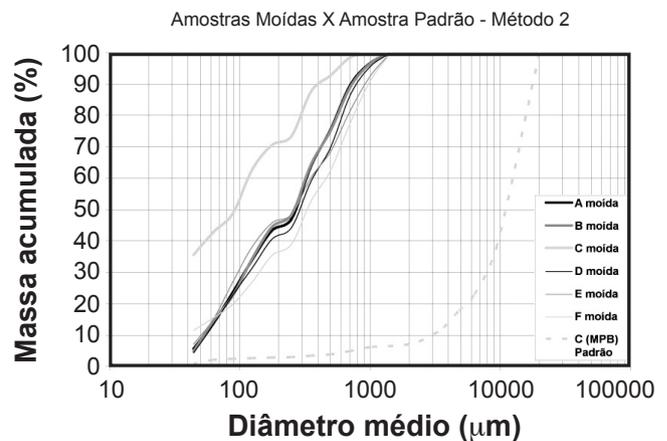


Figura 5: Distribuição granulométrica acumulada das amostras moídas e padrão – Método 2.

[Figure 5: Cumulative grain size distributions of crushed and milled raw materials - Method 2.]

Tabela II - Percentual em massa menor que a peneira com abertura de 355 μm e coeficiente n após a moagem; condições iniciais: 3,48% e 1,21, respectivamente.

[Table II - Mass percentage finer than 355 μm sieve and distribution coefficient n after milling; initial conditions were 3.48 % < 355 μm and $n = 1.21$.]

Amostra	% < 355 μm	n *	Dureza (classificação)
A	63,99	0,72	1 ^a
B	64,45	0,65	3 ^a
C	87,62	0,34	6 ^a
D	59,06	0,67	2 ^a
E	60,21	0,58	4 ^a
F	52,77	0,57	5 ^a

* os valores de R^2 das curvas referentes às MP moídas estiveram todos acima de 0,93.

quando comparadas com a MPB padrão C; passando de 1,21 para valores inferiores. Uma maneira de classificar as amostras no que diz respeito à dureza característica de cada uma (dificuldade em ser moída no moinho de martelos), foi observar o quanto o valor de n se aproximou do valor correspondente ao empacotamento máximo dos grânulos, ou seja, 0,37. Dessa forma, foi possível classificá-las quanto à dureza, como mostra a Tabela II. A amostra C tem a menor dureza (6^o lugar - fato confirmado pelo maior rendimento de moagem), seguida pela amostra F (5^o lugar - friável); a amostra A foi classificada como sendo a mais dura, apesar de apresentar um bom rendimento de moagem, isso se justifica pelo fato de que os grânulos desta amostra apresentam formato lamelar, e a razão de aspecto deve ser levado em conta (uma vez que a moagem deste tipo de grânulo é mais difícil), assim a inclinação da curva de distribuição pode ser alterada por este fator, o que dificulta a comparação com as outras amostras; dentre as amostras que têm raio de aspecto parecidos (B, C, D, E e F) a amostra D é a mais dura, seguida de B, que por ser friável apresenta um bom rendimento de moagem; a amostra E apresentou dureza e rendimento de moagem intermediários. Também foi possível comparar as

durezas das amostras C e B entre si (extraídas na mesma jazida, porém de bancadas diferentes: superior e inferior, respectivamente), de modo que se comprovou o fato relatado pelos profissionais que trabalham na extração de argilas (argileiros): “As argilas extraídas de bancadas mais profundas são, em geral, mais duras”.

CONCLUSÕES

O rendimento de moagem em moinho de martelos não depende somente da distribuição granulométrica que as matérias-primas de via seca possuem. Outras variáveis como a razão de aspecto e o caráter friável dos grânulos podem interferir sobre os valores de rendimento de moagem obtidos. A metodologia proposta para avaliação da dureza das matérias-primas mostrou-se eficiente quando a razão de aspecto e o caráter friável dos grânulos eram parecidos (argilas de uma mesma jazida ou formação).

REFERÊNCIAS

- [1] Vários autores, Preparazione materie prime e formatura di piastrelle ceramiche, S.A.L.A., Modena, Itália (2004) 53.
- [2] S. R. Christofolletti, M. R. Masson, W. Mijolaro, M. M. T. Moreno, J. V. Valarelli, Os principais contaminantes minerais das rochas sedimentares da Formação Corumbataí e sua influência na matéria-prima cerâmica, Cerâmica Industrial **8**, 2 (2003) 35-41.
- [3] E. J. Prior, Mineral Processing, 3rd Ed., Appl. Sci. Publishers Ltd., Essex, Inglaterra (1978) 69.
- [4] I. R. de Oliveira, A. R. Studart, R. G. Pileggi, V. C. Pandolfelli, Dispersão e empacotamento de partículas - princípios e aplicações em processamento cerâmico, Fazendo Arte Editorial, S. Paulo, SP (2000) 125-132.
- [5] D. R. Dinger, Utilização das sub-rotinas DRD para ajustar a retração de queima e a absorção de água de produtos extrudados, Cerâmica Industrial **9**, 3 (2004) 24-29.
- [6] J. E. Funk, D. R. Dinger, Predictive process control of crowded particulate suspensions applied to ceramic manufacturing, Kluwer Academic Publ., Norwell (1997) 87. (Rec. 03/02/2009, Ac. 06/06/2009)