

A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial

Parte III: Variáveis do Processo de Compactação

J.L. Amorós Albaro

Instituto de Tecnologia Cerâmica

Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas

Universitat Jaume I, Castellón, Espanha

Resumo: No desenvolvimento do tema se aborda primeiramente a preparação do pó para prensagem e os aditivos usualmente empregados (lubrificantes, plastificantes e ligantes). A seguir são analisados os fenômenos e processos que ocorrem nas distintas etapas da prensagem: preenchimento do molde, compactação e extração das peças prensadas. Na etapa da compactação, são estudados os estados e mecanismos de compactação, que relacionam a redução da porosidade da camada de aglomerados com a pressão de compactação. Posteriormente se estuda a influência das distintas variáveis de operação (em especial as características do pó) sobre a evolução da operação de compactação e as propriedades das peças. São abordadas as influências dos aditivos, a compacidade dos grânulos, o tamanho médio e a distribuição de tamanhos dos aglomerados e a estrutura dos grânulos. Finalmente se estuda a transmissão da pressão na camada de pó e, na prensagem uniaxial, o efeito de parede.

Também são estudadas as relações entre a resistência mecânica e as características das peças prensadas, analisando o efeito dos ligantes e da umidade; da compacidade das peças e da plasticidade e tamanho dos grânulos do pó granulado. Na parte final são detalhados os dois tipos de prensagem, o uniaxial e o isostático, apresentando as diferenças das técnicas e dos programas de compactação usualmente empregados na indústria assim como os principais defeitos e problemas associados às técnicas de prensagem.

Palavras-chaves: *pó de prensagem, aditivos, fases da prensagem, equação de compactação, resistência mecânica de peças prensadas, prensagem de revestimentos cerâmicos*

Influência de algumas variáveis de operação sobre o processo de compactação. Características dos aglomerados.

A variação experimentada pela compacidade e pela estrutura porosa da massa durante a operação de prensagem, assim como a microestrutura resultante da peça dependem fundamentalmente, por um lado, do comportamento mecânico dos grânulos, que é função de suas características, e por outro lado das características estruturais das partículas (forma, tamanho e distribuição) que formam os grânulos. A velocidade com que a carga é aplicada, bem como o tempo de permanência na carga máxima, exercem um grande efeito na recuperação elástica e na saída de gases durante a compactação, praticamente

não exercendo influência, entretanto, sobre a compacidade e sobre a microestrutura da peça resultante.

As características das partículas mencionadas acima influem consideravelmente sobre a compacidade dos empacotamentos que formam os grânulos, exercendo um efeito marcante tanto na evolução da compacidade e da estrutura porosa em função da aplicação da carga como sobre a microestrutura da peça resultante. Entretanto, como as características das partículas vêm determinadas quase sempre pelo tipo e propriedades do produto final que se deseja obter, e não pelo processo de conformação que se emprega, elas não são consideradas variáveis na operação de prensagem.

As características dos grânulos, tais como natureza e proporção de ligantes e plastificantes, conteúdo em umidade, estrutura (ocos ou maciços), e compacidade, exercem influência sobre o comportamento mecânico do aglomera-

do – dureza, resistência mecânica – afetando também o processo de compactação da massa.

O parâmetro mais utilizado para caracterizar o comportamento mecânico dos grânulos é a pressão aparente de fluência dos grânulos (ou aglomerados), que é definido como sendo o valor da pressão em que os aglomerados começam a se romperem ou deformarem-se plasticamente, durante a compactação. O parâmetro é determinado a partir da variação da compacidade da massa em função da pressão de prensagem. De fato, tem-se demonstrado frequentemente que ao representar a compacidade em função do logaritmo da pressão, obtém-se duas regiões lineares distintas. A interseção do prolongamento destes dois segmentos de reta determina a pressão de fluência, P_f (Figura 21). Foi comprovado experimentalmente e justificado teoricamente que P_f está diretamente relacionado com a resistência mecânica do grânulo à compressão.

As relações entre as características de grânulo mencionadas acima e P_f nos permitem compreender a influência que elas exercem sobre a fase de compactação.

1. Influência dos aditivos

Durante o estudo do efeito dos aditivos sobre o processo de compactação é conveniente fazer uma divisão entre massas que contém uma proporção elevada de argila e que não necessitam de aditivos orgânicos (que atuam como ligantes, plastificantes ou lubrificantes) das demais massas, nas quais são necessários. No caso de composições argilosas, a fração coloidal de partículas atua como ligante e a água como plastificante. Nestas composições, a distribuição do tamanho de partículas que compõe os aglomerados é muito mais larga que nas demais, pelo que a compacidade final da peça também é mais alta. Por isto, durante a compactação destas composições, empregando-se pressões de prensagem elevadas e umidade da massa também elevada, a água pode vir a saturar os poros existentes na peça, impedindo sua posterior compactação. Este fenômeno não se verifica em composições não-argilosas.

Composições argilosas: influência da umidade dos aglomerados

O comportamento da massa durante a fase de compactação, bem como a compacidade e microestrutura da peça prensada, dependem consideravelmente do teor de umidade dos aglomerados, uma vez que a água atua como plastificante dos minerais argilosos, de tamanho coloidal. De fato, com o aumento do número de camadas de moléculas de água adsorvidas sobre a superfície das partículas, aumenta também a distância entre elas, o que se traduz, de um lado, em uma diminuição da resistência mecânica do aglomerado (P_f), e por outro, em um aumento da ductilidade (ou plasticidade) do material (Figura 22). A pressão de fluência (P_f) dos grânulos diminui com o aumento do teor de umidade de forma exponencial (Figura 23), devido

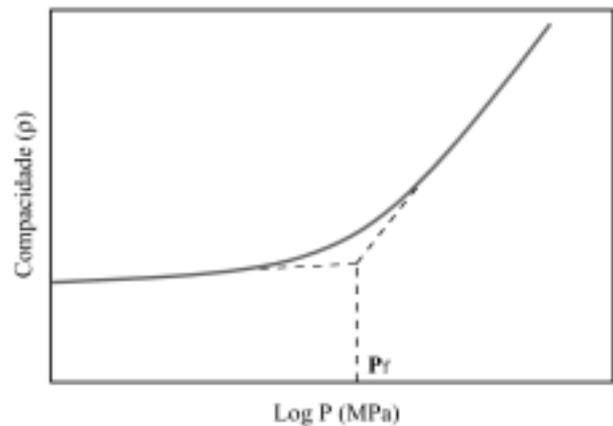


Figura 21. Determinação da pressão aparente de fluência (P_f) de uma massa cerâmica.

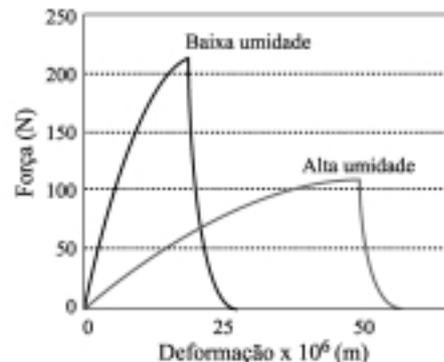
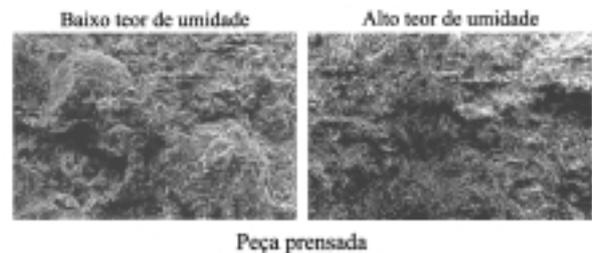


Figura 22. Influência do teor de umidade do aglomerado sobre seu rompimento e deformação em baixas pressões.

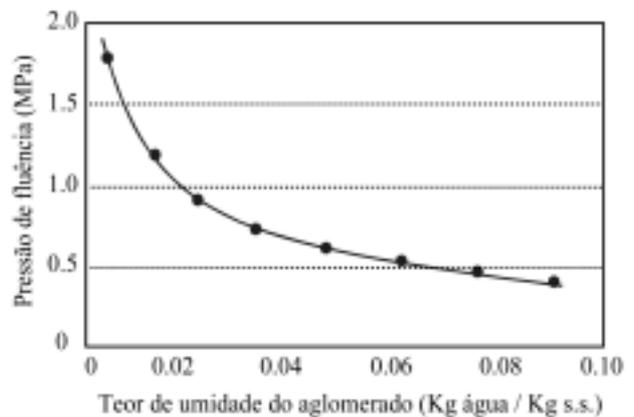


Figura 23. Variação da pressão de fluência (P_f) de uma massa em função do teor de umidade (X_p).

a que a força de ligação entre as partículas de argila apresentam comportamento semelhante.

Esta diminuição de P_f implica em um aumento da compressibilidade da massa (K_I do modelo proposto) o que significa que, para uma mesma pressão de compactação, o grau de avanço da compactação, devido exclusivamente à redução do volume de poros intergranulares (C_g), aumenta, ou seja, o volume de poros intergranulares eliminado é maior (Figura 24).

Da mesma forma, com a diminuição de P_f é reduzido o valor da constante P_b da Equação 15, e com ela o valor da pressão em que começa a eliminação massiva dos poros intragranulares (ponto de inflexão da curva $C_p =$ função (P)) (Figura 25). Em altas pressões de prensagem ocorrem duas circunstâncias contrapostas que afetam de forma diferente o volume de poros que pode ser atingido pela peça em pressões muito altas ($V_{pp\infty}$), ou o valor de a_2 , que representa o valor máximo do grau de avanço da compactação devido exclusivamente à eliminação dos poros intragranulares (C_p). De fato, por um lado, com o aumento da plasticidade do sistema água-argila, facilita-se a reordenação de partículas buscando um maior empacotamento e se reduz a expansão elástica do sistema, fatores que tendem a reduzir o volume de poros em pressões muito altas ($V_{pp\infty}$), ou aumentar o valor de a_2 .

Por outro lado, com o aumento do teor de umidade, aumenta a relação volume de líquido/volume de poros, também chamada de grau de saturação, fato que reduz a efetividade da carga aplicada, especialmente em valores próximos à saturação, uma vez que parte desta carga passa a aumentar a pressão da água nos poros, e não a aumentar a tensão nos pontos de contato existentes entre as partículas. Ambos os efeitos resultam em que o comportamento dos parâmetros a_2 e ρ_0 apresentam um valor máximo para um dado valor de umidade.

O efeito do teor de umidade da massa sobre a_2 se traduz nos seguintes fenômenos:

i) Para valores de pressão de prensagem e umidade elevados, um aumento na pressão supõe apenas um ligeiro aumento do grau de avanço da compactação.

ii) A existência de uma umidade crítica de prensagem. Para cada pressão de prensagem, existe um teor de umidade da massa que resulta em um valor máximo do grau de avanço da compactação, e portanto, em um máxima compacidade da peça.

Na Figura 26 é apresentada, para uma massa utilizada na fabricação de grés porcelanato, a variação da compacidade em função da pressão de prensagem, para diferentes teores de umidade da massa.

As curvas foram obtidas a partir das Equações 15 e 20, com os valores de parâmetros indicados na Tabela II. Confirma-se o efeito marcante da umidade dos aglomerados sobre a compacidade da massa e também sobre a_2 ,

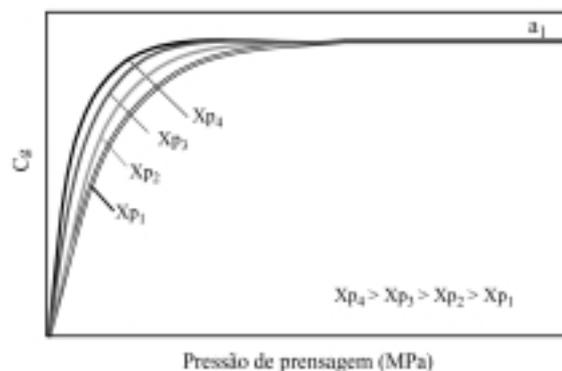


Figura 24. Variação do grau de avanço da compactação devido exclusivamente à eliminação de poros intergranulares (C_g) em função da pressão de prensagem (P). Efeito do teor de umidade do aglomerado (X_p).

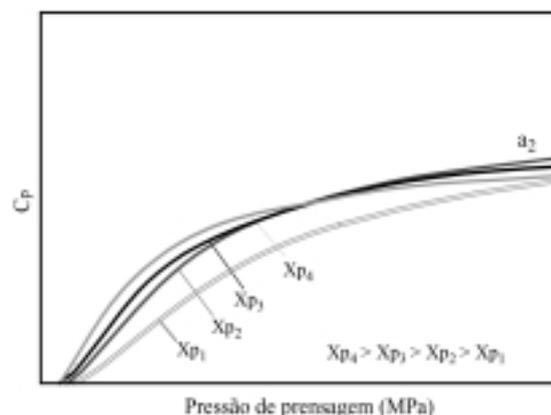


Figura 25. Variação do grau de avanço da compactação devido exclusivamente à eliminação de poros intragranulares (C_p) em função da pressão de prensagem (P). Efeito do teor de umidade do aglomerado (X_p).

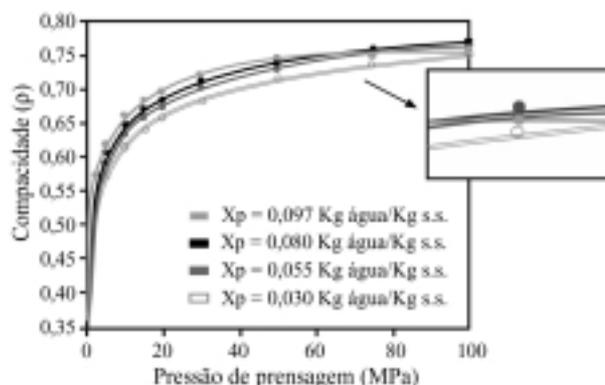


Figura 26. Variação da compacidade da massa (p) em função da pressão de prensagem, de acordo com o modelo proposto. Efeito do teor de umidade do aglomerado (X_p).

ambos já analisados, e ainda a existência de um valor crítico de umidade, próximo a 8%, para uma pressão de 65 MPa.

Em outros tipos de massas argilosas, com distribuição de tamanho de partículas mais grossa e larga, como as empregadas na fabricação de pisos esmaltados, os pares de

valores pressão de prensagem – umidade crítica podem ser menores.

Na prensagem de massas argilosas, a pressão de prensagem pode ser inferior a 50 MPa (valor limite empregado na prensagem isostática de peças de cerâmica branca), e o teor de umidade utilizado, que é sempre inferior ao valor crítico, salvo nos casos de conformação plástica, que não são objetos deste trabalho, raramente superam os 7%.

Composições não-argilosas: Influência da natureza e proporção da fase ligante (ligante + plastificante).

Para estas composições, a relação volume da fase ligante/volume de partículas do grânulo (V_l/V_s) pode ser inferior a 5%, muito menor que a razão volume de água/volume de sólido (V_a/V_s), para as composições que contém argila, que podem chegar a 20%.

Com esta baixa proporção de ligante, pode-se supor que ele se encontra distribuído nos pontos de contato existentes entre as partículas (modelo pendular) formando ligações discretas entre elas. Pode-se deduzir, neste caso, que o valor da resistência mecânica ou o ponto de fluência (P_f) do grânulo pode ser descrito de forma aproximada pela equação:

$$P_f = \left(\frac{\rho_G}{1 - \rho_G} \right) \cdot \left(\frac{V_l}{V_s} \right) \cdot S_0$$

sendo:

ρ_G : a compacidade do grânulo (volume de sólido/volume aparente do grânulo)

$\frac{V_l}{V_s}$: a relação volume da fase ligante/volume de sólido

S_0 : resistência mecânica da fase ligante (MPa)

A resistência mecânica da fase ligante, S_0 , o seu comportamento mecânico (frágil/dúctil), e o valor máximo de deformação plástica antes da ruptura, dependem ainda da natureza do ligante propriamente dito (por exemplo, álcool polivinílico, PVA), da natureza e quantidade do plastificante (por exemplo, água ou polietilenoglicol, PEG). O polímero, quando isento de plastificante, ou com um baixo teor, é rígido, deforma-se elasticamente em baixas pressões e tem resistência mecânica elevada. À medida em que se aumenta a quantidade de água adsorvida no polímero, seu comportamento vai se tornando cada vez mais plástico, aumentando sua ductilidade e diminuindo sua resistência mecânica. A mesma coisa acontece ao se modificar a proporção de PEG em uma mistura PEG-PVA.

Devido à natureza higroscópica do PVA e de outros polímeros, a quantidade de água que os grânulos absorvem do ambiente depende de sua umidade relativa (Figura 27). Da mesma forma, o teor de umidade dos grânulos irá influenciar também a pressão de fluência dos grânulos (Figura 28) e a sua deformação e/ou destruição em baixas pressões (Figura 29).

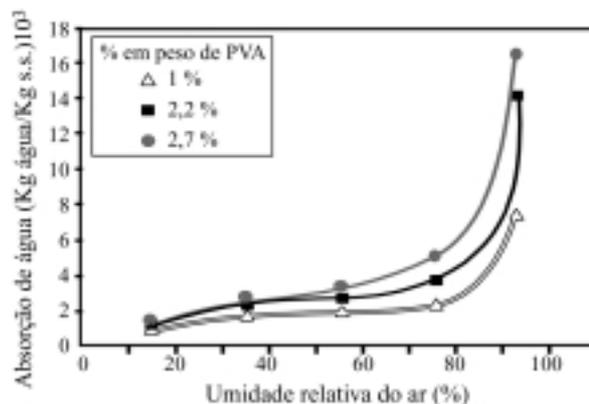


Figura 27. Isotérmicas de absorção de uma massa de alumina contendo álcool polivinílico (PVA).

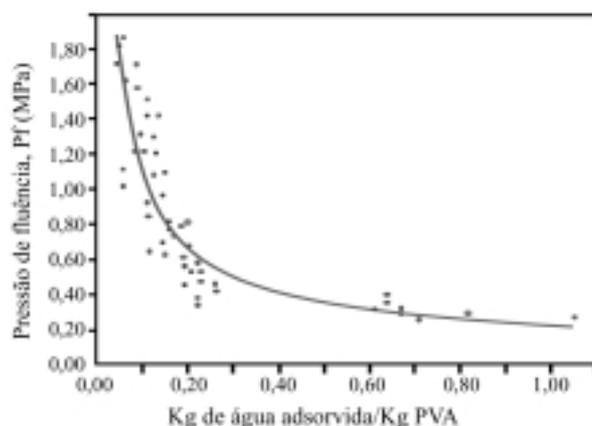
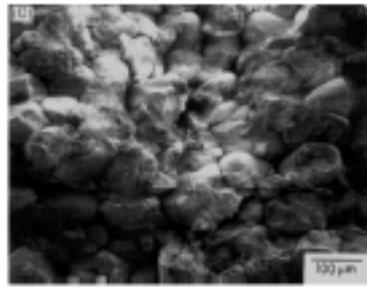


Figura 28. Variação da pressão de fluência (P_f) de grânulos de alumina contendo álcool polivinílico em função da relação água adsorvida/Kg de PVA.

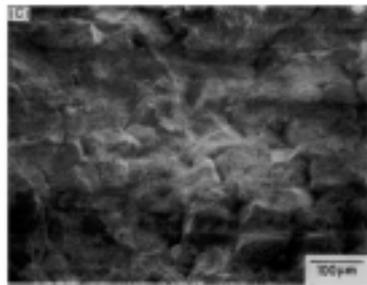
O efeito da pressão de fluência do grânulo sobre seu comportamento durante a etapa de compactação é análogo ao anteriormente descrito para as composições argilosas, para teores de umidade inferiores à umidade crítica. Como exemplo, na Figura 30 são apresentados, para uma massa de alumina atomizada, com 2% de PVA como ligante, a variação da compacidade da massa em função da pressão de prensagem para distintos teores de umidade adsorvidas do ar.

2. Compacidade do grânulo (ρ_G)

A medida em que se aumenta a compacidade do grânulo, ρ_G , aumenta também sua pressão aparente de fluência, P_f . Este aumento de P_f faz com que se torne mais difícil a eliminação dos poros da massa, tanto os intergranulares como os intragranulares. Como conseqüência, para uma mesma pressão de prensagem, o grau de avanço da compactação da massa, devido à eliminação dos poros intergranulares, C_g , e intragranulares, C_p , sempre é menor para o grânulo mais denso. Por outro lado, a compacidade



Baixo teor de umidade



Alto teor de umidade

Figura 29. Influência do teor de umidade do aglomerado sobre sua deformação durante a fase de compactação. Massa de alumina atomizada contendo álcool polivinílico.

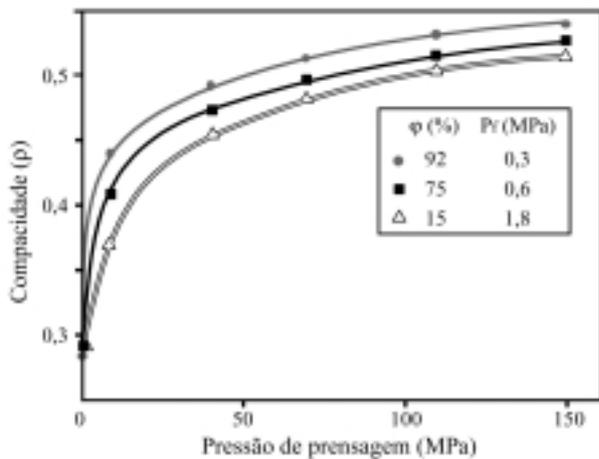


Figura 30. Variação da compacidade (ρ) da massa em função da pressão de prensagem. Influência do teor de umidade do aglomerado em equilíbrio com a umidade atmosférica (ϕ).

da massa, ρ , é mais elevada quando se parte de grânulos mais compactos, com maior ρ_G (Figura 31).

Para o caso extremo, em que os grânulos, além de serem muito densos, sejam também muito resistentes à deformação, vale dizer, em que P_f seja muito alto (devido, por exemplo, a um conteúdo excessivamente baixo de plastificante), ocorre que em pressões habituais de prensagem os poros intergranulares não são totalmente eliminados, observando-se na peça conformada a presença de grânulos não totalmente deformados e poros de tamanho grande,

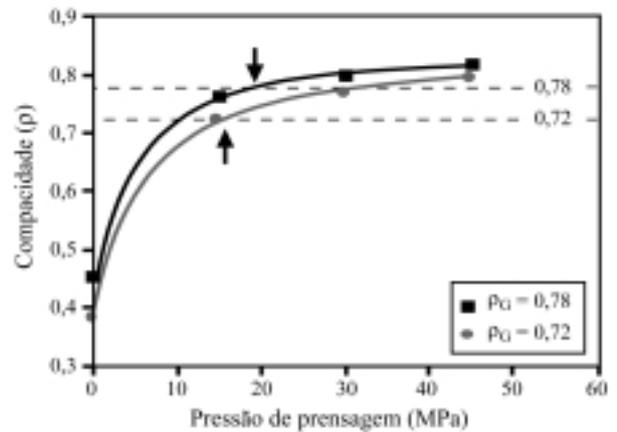


Figura 31. Variação da compacidade da massa em função da pressão de prensagem. Efeito da compacidade do grânulo. Massa para fabricação de revestimentos.

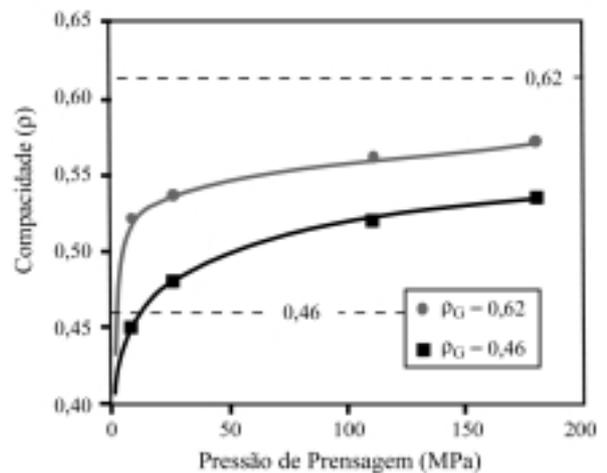


Figura 32. Variação da compacidade da massa em função da pressão de prensagem. Efeito da compacidade do grânulo. Massa para fabricação de peças de alta alumina.

fatos que repercutem negativamente tanto sobre a resistência mecânica a verde e após secagem, como sobre a densidade final da peça queimada. Nestes casos tão exagerados, a densidade da peça prensada, ρ , é inferior à densidade dos grânulos, ρ_G , como pode ser visto na Figura 32.

3. Tamanho médio e distribuição de tamanhos

De uma forma geral, se o teor de plastificante nos grânulos é alto, o efeito do tamanho médio e da distribuição de tamanho dos grânulos da massa sobre sua compacidade, em pressões habituais de prensagem, são desprezíveis, como se pode ver na Figura 33. Por outro lado, em baixas pressões de prensagem, sobretudo com grânulos com baixo teor de plastificante, fica comprovado que uma compacidade mais elevada é obtida com o emprego de grânulos de

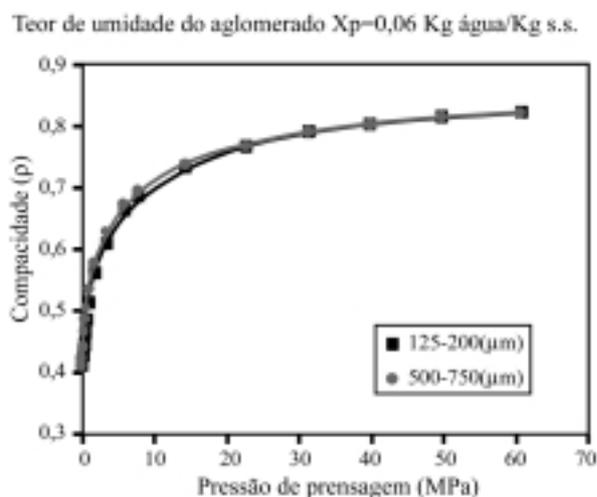


Figura 33. Variação da compacidade da massa em função da pressão de prensagem. Efeito do tamanho de grânulo. Massa para fabricação de revestimentos.

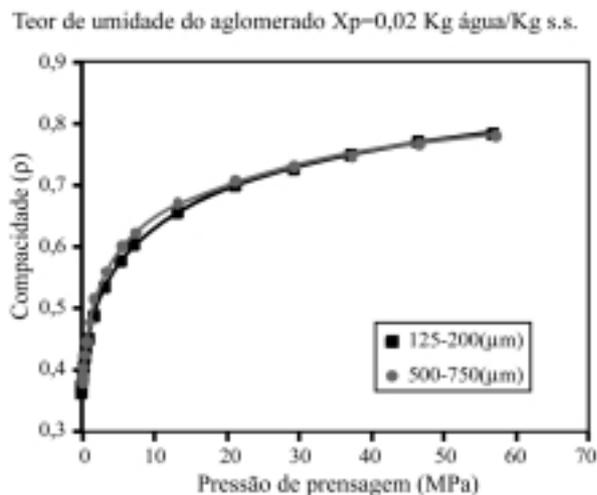


Figura 34. Variação da compacidade da massa em função da pressão de prensagem. Efeito do tamanho de grânulo. Massa para fabricação de revestimentos.

maior tamanho (Figura 34), que são os que apresentam uma pressão de fluência mais baixa (Figura 35).

Neste último caso, quando a pressão de prensagem e o teor de plastificante da massa são também reduzidos, as microestruturas dos corpos prensados se apresentam heterogêneas, em todos os casos se observando poros intergranulares. Nesta situação, a peça menos heterogênea é a obtida a partir de grânulos mais finos, uma vez que o tamanho dos poros intergranulares também será menor.

4.Estrutura dos aglomerados (ocos ou maciços)

Exclusivamente, se o teor de plastificante é reduzido e a pressão de prensagem é baixa, o grânulo não se deforma completamente durante a fase de compactação. Devido a

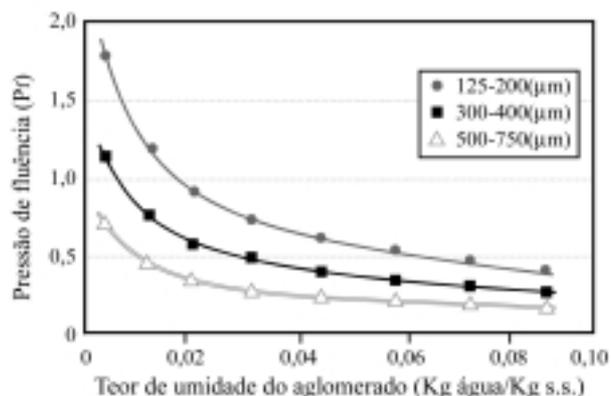


Figura 35. Variação da pressão de fluência (P_f) de uma massa em função do teor de umidade (X_p). Efeito do tamanho de grânulo.

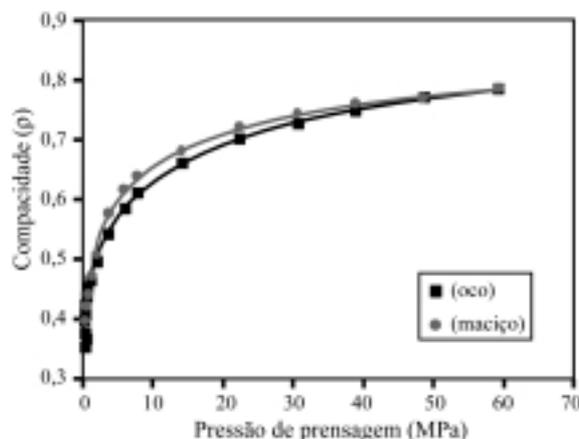


Figura 36. Variação da compacidade da massa em função da pressão de prensagem. Efeito da estrutura do aglomerado. Massa para fabricação de revestimentos. Teor de umidade da massa $X_p=0,02$ Kg água/Kg s.s.

isto, em princípio, a compacidade da massa dependerá significativamente do fato de serem os grânulos ocos ou maciços. De fato, para uma mesma pressão de prensagem, o grau de avanço da compactação experimentado por uma massa composta por grânulos ocos será maior que o correspondente a uma massa de grânulos maciços, uma vez que os grânulos ocos são menos resistentes à deformação – sua pressão de fluência é menor. Entretanto, a compacidade de uma massa de grânulos ocos, compactada a baixas pressões, é menor que a que corresponderia a uma massa de grânulos maciços, devido às diferenças estruturais existentes entre eles, no início da operação de prensagem (Figura 36). Para valores habituais de pressão de prensagem, se o teor de plastificantes é elevado, os grânulos se deformam completamente, e por isto não se observam diferenças nem na compacidade das peças e nem na microestrutura resultante, independente da peça ser obtida por uma massa de grânulos ocos ou maciços.

Saída do ar do interior da massa através de fluxo viscoso.

A duração do ciclo de compactação, bem como a seqüência com que se aplica a pressão à massa, estão condicionados, basicamente, pela necessidade de se expulsar a maior quantidade de ar possível da introduzida nas cavidades do molde durante a etapa de preenchimento. Uma má desaeração do compacto traz como conseqüência uma pressurização excessiva do ar aprisionado nos poros da peça durante a fase de compactação, provocando durante e após fase de extração do corpo uma excessiva expansão da peça, fato que freqüentemente acarreta o surgimento de certos defeitos. A saída do ar através dos poros do corpo se dá através de um mecanismo de fluxo viscoso, devido aos gradientes de pressão que se estabelecem entre o interior do corpo e a atmosfera externa.

Devido ao fato de que conforme se dá a evolução do processo de compactação altera-se simultaneamente tanto a distribuição do ar no interior do corpo como também sua estrutura porosa, torna-se praticamente impossível desenvolver um modelo que descreva a cinética do processo de saída dos gases de maneira satisfatória. Entretanto, ainda que de maneira apenas qualitativa, faz-se necessário determinar os fatores que em maior ou menor medida influenciam a velocidade do processo, com a finalidade de se otimizar, ainda que de forma empírica, o ciclo de compactação. Dentre estes fatores, pode-se destacar: as características do molde (dimensões e formato da cavidade do molde, folga entre os punções e a matriz, etc.) e a permeabilidade do ar no compacto e sua evolução em função da pressão de prensagem.

A permeabilidade do corpo, K_p , se relaciona de forma aproximada com sua compactidade (ρ) e com o raio médio de poro do empacotamento, r_p , de acordo com a equação:

$$K_p = \frac{(1 - \rho) \cdot r_p^2}{8 \cdot \lambda^2}$$

Nesta equação, λ é um *coeficiente de tortuosidade* que se introduz na dedução do modelo, com a finalidade de se levar em conta que os capilares cilíndricos e paralelos, que constituem o sistema poroso ideal, na verdade não são retos, e sim tortuosos.

Desta relação e da variação observada para a compactidade e para o tamanho médio de poro em função da pressão de prensagem (Figura 37) pode-se deduzir que a permeabilidade do corpo diminui drasticamente conforme avança o processo de compactação, sendo esta variação condicionada pelas características da massa. De fato, para uma mesma pressão de prensagem, a medida que se reduz a pressão de fluência dos aglomerados, reduz-se o tamanho dos poros e aumenta-se a compactidade da massa, fatores que resultam em uma redução da permeabilidade da massa. Desta forma, um aumento no teor de água ou de plastifi-

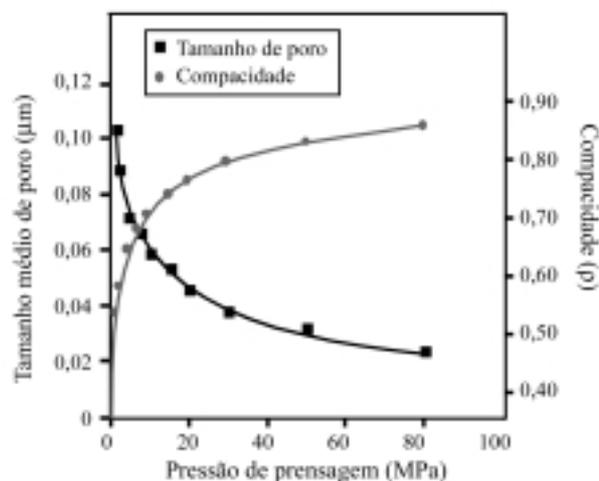


Figura 37. Variação da compactidade e do tamanho médio de poro do corpo em função da pressão de prensagem. Massa para a fabricação de revestimentos. Teor de umidade da massa de 0,06 Kg água/Kg s.s.

cante na massa diminui sua permeabilidade durante toda a fase de compactação. Para o caso de composições argilosas, com teores de umidade elevados, o efeito desta variável sobre a permeabilidade é ainda mais acentuado, uma vez que, em pressões elevadas, parte do sistema capilar está preenchido pela água, não contribuindo, portanto, para o fluxo de ar.

Da mesma forma, a medida em que se diminui o tamanho médio dos aglomerados ou ainda das partículas que formam os grânulos, diminui-se também o tamanho dos poros nas etapas inicial e intermediária do processo de compactação, quando os poros são intergranulares ou intragranulares, bem como na etapa final, quando são exclusivamente intragranulares, o que se traduz também em uma diminuição da permeabilidade do material durante todos os estágios do processo.

Transmissão da pressão através do corpo. Efeito de parede na prensagem uniaxial.

As forças de fricção que se estabelecem na interface existente entre a massa e a parede da matriz do molde e nos pontos de contato existentes entre os aglomerados e entre as partículas durante a prensagem uniaxial, provocam gradientes de pressão e de compactidade no corpo. O modelo e o procedimento de cálculo para determinar a distribuição de pressões no material ao longo da etapa de compactação é sempre de grande complexidade e necessita de mais informações sobre as características mecânicas dos materiais do que a princípio se pode dispor. Entretanto, na maioria dos casos, na hora de se escolher o tipo de processo de conformação a ser empregado na produção de uma determinada peça, selecionar os aditivos de prensagem ou otimizar as variáveis de operação do processo, geralmente é suficiente dispor de uma distribuição aproximada da

pressão ao longo do corpo (por exemplo, a pressão média axial e sua respectiva coordenada) e conhecer de maneira aproximada o efeito que sobre ela exercem as características da massa, a forma e dimensões da peça que se deseja obter e a rugosidade superficial do molde.

Este comportamento pode ser obtido a partir de um modelo proposto para o caso da prensagem uniaxial de efeito simples de um corpo cerâmico cilíndrico (Figura 38).

O modelo parte das seguintes hipóteses:

i) Em qualquer plano perpendicular ao eixo de aplicação da carga a pressão axial é considerada uniforme e igual a uma pressão média σ_A .

ii) A pressão radial média, ρ_R , que atua sobre a parede do molde, a uma distância z do ponto de aplicação de carga, é proporcional à pressão axial média que atua sobre o plano situado em z , σ_A .

$$\sigma_R = k_R \sigma_A \quad [21]$$

k_R é o coeficiente de pressão radial que depende exclusivamente das características da massa.

iii) Obedece-se a Lei de Coulomb da fricção. Assim, a tensão de cisalhamento média, τ , que atua sobre a superfície da massa em contato com a parede do molde, devido à fricção entre ambos, é proporcional à pressão radial média.

$$\tau = \mu \rho_R \quad [22]$$

sendo μ o coeficiente de fricção do sistema parede/massa.

Ao se aplicar um balanço de forças, a um cilindro diferencial de diâmetro D e altura Δz têm-se:

$$\sigma_{A|z} \cdot \frac{\pi}{4} D^2 - \sigma_{A|z+\Delta z} \cdot \frac{\pi}{4} D^2 - \tau \cdot \pi D \Delta z = 0$$

reordenando os termos:

$$(\sigma_{A|z+\Delta z} - \sigma_{A|z}) \frac{D}{4} = -\tau \cdot \Delta z \quad [23]$$

Separando as variáveis e tomando o limite quando Δz tende a zero:

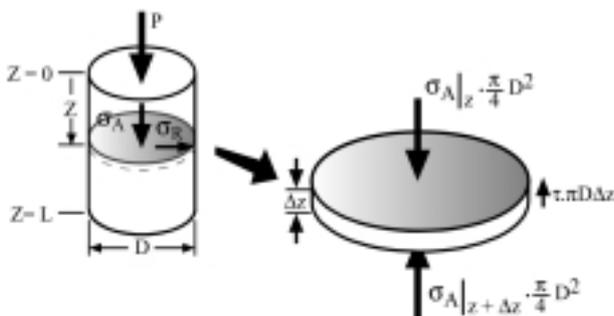


Figura 38. Transmissão da pressão de prensagem. Efeito de parede.

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\sigma_{A|z+\Delta z} - \sigma_{A|z}}{\Delta z} = -\frac{4}{D} \tau \quad [24]$$

Obtém-se que:

$$\frac{d\sigma_A}{dz} = -\frac{4}{D} \tau \quad [25]$$

Ao introduzirmos as Equações 21 e 22 na Equação 25 resulta que:

$$\frac{d\sigma_A}{dz} = -\frac{4}{D} k_R \mu \sigma_A \quad [26]$$

Separando as variáveis e integrando entre os limites:

$$\text{para } z = 0 \quad \sigma_A = P$$

$$\text{para } z = z \quad \sigma_A = \sigma_A$$

$$\int_{\sigma_A=0}^{\sigma_A} \frac{d\sigma_A}{\sigma_A} = -\frac{4}{D} \mu k_R \int_{z=0}^z dz$$

$$\sigma_A = P \exp\left(-\frac{4}{D} \mu k_R z\right) \quad [28]$$

Expressão que indica que a pressão axial média, ρ_A , que atua sobre um plano paralelo ao de aplicação da carga e situado a uma distância z deste, diminui de forma exponencial à medida que se aumenta a distância z . Esta redução da pressão transmitida é tanto maior quanto mais altos forem os valores dos coeficientes de fricção do sistema massa/parede, μ , e do coeficiente de pressão radial da massa, k_R , este último efeito sendo menor a medida em que se aumenta o diâmetro da peça.

A pressão média mais baixa, portanto, atua sobre o fundo do molde, P_L , denominando-se razão de transmissão de pressão o quociente entre esta pressão e a pressão aplicada, P_L/P .

Quando se introduz como segunda condição de contorno para a integração da Equação 26 os valores das variáveis correspondentes ao fundo do molde:

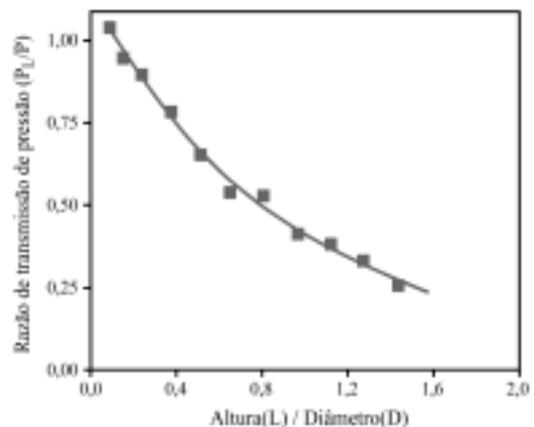


Figura 39. Adequação do modelo desenvolvido aos resultados experimentais.

para $z=L$ $\sigma_A=P_L$

se obtém a expressão que relaciona a razão de transmissão da pressão, P_L/P , com as dimensões do corpo, L/D e com os parâmetros μ e k_R acima mencionados.

$$\frac{P_L}{P_0} = \exp \left(- \frac{4L}{D} \mu k_R \right) \quad [29]$$

Como se pode comprovar na Figura 39, a adequação do modelo aos resultados experimentais é excelente.

O coeficiente de pressão radial, k_R , pode oscilar entre 0,4 e 0,5, dependendo das características das partículas e dos aglomerados que constituem a massa.

O coeficiente de fricção do sistema parede/massa, μ , pode oscilar entre 0,2 e 0,3, segundo a utilização ou não de lubrificantes. A velocidade com que se aplica a carga exerce um efeito muito pequeno sobre o coeficiente de fricção, da mesma forma que a natureza e proporção dos ligantes e plastificantes empregados, exceto no sistema argila-água, que além de ser um ligante plastificado, também atua como lubrificante.