

A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial

Parte II: A Compactação

J.L. Amorós Albaro

Instituto de Tecnología Cerámica

Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas

Universitat Jaume I. Castellón. España.

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 compactidade 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 compactidade das peças e da plasticidade e tamanho dos grânulos do pó granulado. Na parte final são detalhados os dois tipos de prensagem, o iniaxial 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*

Fase de compactação

Quando o volume do material granulado contido no interior de uma matriz (rígida ou flexível) é submetido a uma tensão de compressão suficientemente elevada (unidirecional ou isostática) podem se dar os seguintes processos, fenômenos ou trocas:

- Uma consolidação permanente do material, ou seja, um aumento na compactação do corpo, que persiste depois de retirada a carga. Este processo implica basicamente no fluxo, na reordenação, na deformação plástica e na destruição dos grânulos, no intervalo de baixas pressões de prensagem, e no deslizamento e reordenação das partículas que constituem os grânulos em pressões habituais de prensagem.
- Uma compressão elástica das partículas, ligantes e lubrificantes líquidos, bem como do gás presente no corpo. Esta deformação se desfaz quando a carga é

eliminada, sendo a responsável pela expansão do material. O fenômeno da expansão é analisado na fase de extração, uma vez que é nesta fase que se manifesta e causa problemas.

- Um fluxo de líquidos e gases através dos poros do corpo por fluxo viscoso, devido aos gradientes de pressão estabelecidos ao longo dos distintos pontos da peça.
- Finalmente, se a prensagem é uniaxial, a fricção entre as partículas e entre estas e as paredes do molde provoca uma distribuição heterogênea da pressão de compactação no volume do material.

Estados e mecanismos da compactação

Na compactação de um material granular (massa) a diminuição de volume dos poros e de seus tamanhos se dá através dos três mecanismos seguintes (Figura 10):

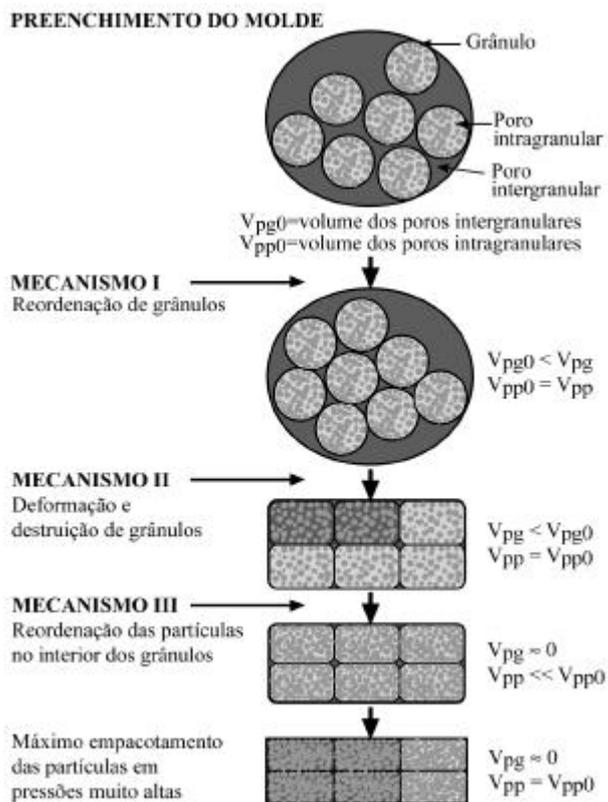


Figura 10. Mecanismos de compactação.

Mecanismo I: Redução do volume ocupado pelos poros intergranulares e de seu volume através do deslocamento e reordenação dos grânulos.

Mecanismo II: Redução do volume e tamanho dos espaços intergranulares por deformação plástica e/ou destruição dos grânulos, dependendo das características mecânicas do grânulo (dureza, deformabilidade, resistência mecânica). Neste mecanismo se inclui o esmagamento de grânulos ocios, geralmente presentes nas massas cerâmicas.

Mecanismo III: Diminuição de volume e tamanho dos poros intragranulares pelo deslizamento e reordenação das partículas buscando alcançar um empacotamento de mais denso.

Convém dizer que a destruição e/ou a deformação plástica das partículas que constituem os grânulos na prática nunca se dá em extensão apreciável, devido tanto a natureza frágil como a elevada dureza das partículas que constituem os materiais cerâmicos.

Com base nas mudanças estruturais (volume e tamanho dos poros, compactação) a que é submetido o corpo com o aumento da pressão e levando-se em conta os intervalos de pressão em que predominam cada um dos mecanismos descritos, a compactação de um material granulado pode ser idealmente dividida em três estágios de compactação (Figura 11).

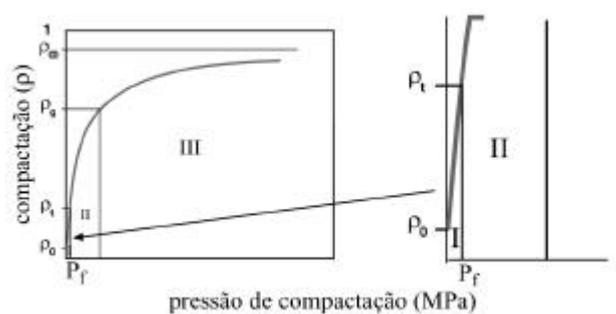


Figura 11. Variação do grau de compactação do corpo com a pressão de prensagem. Estados de compactação.

- Estágio I ou inicial
- Estágio II ou intermediário
- Estágio III ou final

O estágio inicial se estende desde o início da compactação do material (que corresponde à densidade de preenchimento do material, ρ_D) até o valor em que os grânulos atingem o grau máximo de empacotamento sem que ocorra sua deformação ou destruição, que coincide na prática com a chamada pressão aparente de fluência do grânulo, P_f , que se refere ao valor de pressão em que se inicia a deformação e/ou destruição dos grânulos. A compactação do corpo neste ponto se considera praticamente a compactação máxima que se pode obter mediante reordenação dos grânulos através da vibração do material (densidade de compactação), ρ_t . O mecanismo de compactação predominante neste estado é o de deslizamento e reordenação dos grânulos. Apesar do efeito da pressão sobre a densificação da peça (dependendo da curva) ser o de maior valor em todo o processo, neste estágio só se incrementa ligeiramente a compactação do corpo, desde seu valor inicial, ρ_0 até ρ_t .

O estágio intermediário compreende o intervalo de pressões que se estende desde a pressão de fluência (P_f) até o valor de pressão na qual a compactação do corpo coincide com a do grânulo, ρ_G . A maior parte da compactação que ocorre no corpo durante a etapa de prensagem se dá neste estágio, através da deformação e/ou destruição dos aglomerados (mecanismo II). Conforme se aumenta a pressão de prensagem, aumenta a área de contato entre os grânulos e a estrutura da peça vai se tornando mais homogênea, ainda que se possa identificar claramente alguns grânulos (Figura 12). Paralelamente, ocorre a redução do volume e tamanho dos poros intergranulares. Durante todo o processo a distribuição de tamanho de poros é bimodal (Figura 13) e praticamente toda a redução da porosidade é devida à eliminação da porosidade intergranular. A porosidade intragranular permanece praticamente inalterada.

Por último, o estágio final se inicia quando o grau de compactação do corpo se iguala ao do grânulo (ρ_G). Teoricamente, neste ponto desaparece toda a porosidade inter-

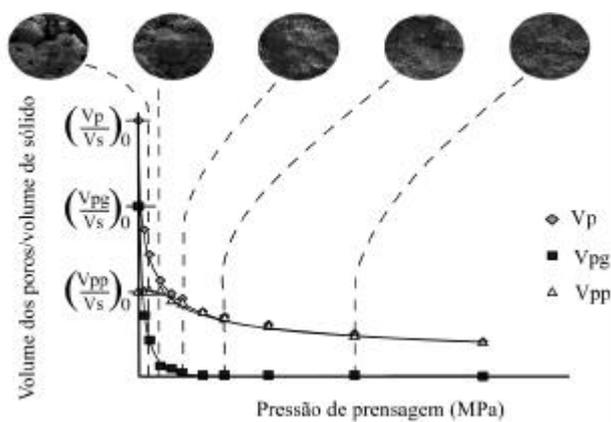


Figura 12. Variação do volume de poros intragranular (V_{pp}), intergranular (V_{pg}) e total (V_p) do corpo em função da pressão de prensagem.

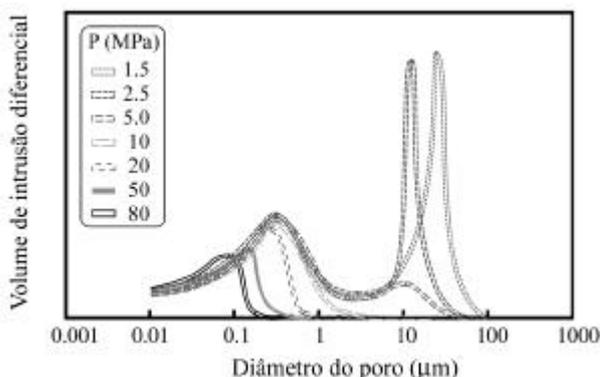


Figura 13. Variação da distribuição de tamanho de poros do corpo com a pressão de prensagem (P).

granular, e a distribuição de tamanho dos poros é monomodal (Figura 13). Como consequência, neste estágio o aumento da compactação do corpo só pode decorrer da eliminação da porosidade intragranular, através do deslizamento e reordenação das partículas (mecanismo III). Com o aumento da pressão, diminui-se o volume e tamanho dos poros, as interfaces entre os grânulos vão se tornando imperceptíveis e a microestrutura da peça é cada vez mais homogênea (Figura 12). Relativamente ocorre pouca densificação neste estágio, especialmente a altas pressões (acima de 30/40 MPa) e quando as partículas que se compactam são duras e frágeis, como ocorre na maioria dos materiais cerâmicos. Assim, em pressões elevadas, um aumento na pressão de prensagem pode ocasionalmente provocar a fratura de agregados porosos e/ou a destruição de aglomerados de partículas que tenham resistido a pressões menores, aumentando ligeiramente a compactação do corpo. De uma maneira geral, a maior parte da carga aplicada neste estágio provoca uma compressão elástica do material, que se armazena sob forma de energia

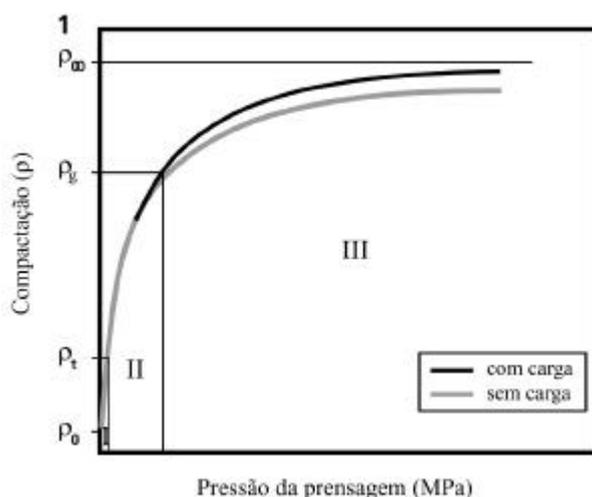


Figura 14. Variação da compactação do corpo em função da pressão de prensagem.

elástica, vindo a ser liberada com a retirada da carga (Figura 14).

De uma maneira geral, a compactação final da peça, por mais que se aumente a pressão de prensagem, é sempre inferior a compactação que corresponderia ao empacotamento mais denso possível das partículas. Isto se deve a um dos seguintes motivos:

i) a formação de empacotamentos irregulares e porosos de partículas que resistem às altas pressões devido a sua fragilidade e dureza, ainda existindo entre elas altíssimas forças de fricção.

ii) Em altas pressões, que correspondem a baixas porosidades, se o conteúdo de ligantes e plastificantes líquidos é elevado, pode ocorrer saturação dos poros da peça pelos mesmos, impedindo a compactação.

Na verdade, os intervalos de pressão onde atuam cada um destes mecanismos não estão tão claramente definidos, uma vez que com frequência dois deles se verificam simultaneamente. De fato, o fluxo e a reordenação de grânulos pode vir acompanhado da deformação plástica e destruição dos mesmos (superposição dos mecanismos I e II). Da mesma forma, é freqüente que o início do processo de redução da porosidade intragranular (mecanismo III) se dê antes da eliminação total da porosidade intergranular através do mecanismo II, tal como pode ser comprovado na Figura 15.

Equação da compactação

Dá-se o nome de equação ou modelo de compactação à expressão que descreve a densificação experimentalada pelo corpo em função da pressão de prensagem.

Com base na evolução apresentada pela estrutura porosa do corpo em função da pressão de prensagem e nos mecanismos que influenciam na compactação vistos anteriormente, foi desenvolvido um modelo ou equação capaz de descrever adequadamente a redução da porosidade ex-

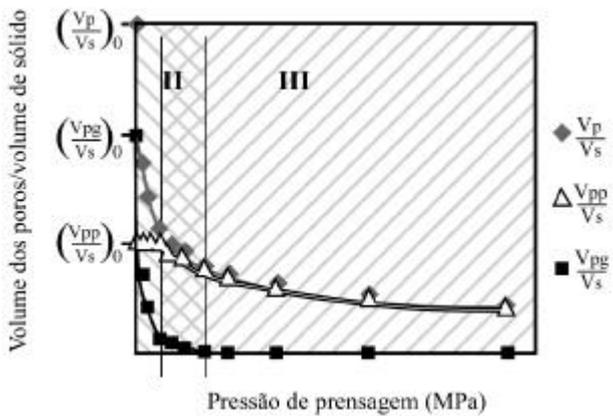


Figura 15. Variação do volume de poros intragranular (V_{pp}), intergranular (V_{pg}) e total (V_p) do corpo em função da pressão de prensagem. Superposição dos mecanismos II e III de compactação.

perimentada pelo corpo em função da pressão de prensagem. A equação desenvolvida apresenta as seguintes vantagens: por um lado, reproduz os resultados experimentais de maneira mais precisa que a maioria das equações tradicionalmente conhecidas; por outro lado, os parâmetros empíricos nas quais ela se baseia são facilmente relacionados com as características da massa.

O modelo foi desenvolvido partindo-se das seguintes hipóteses:

i) Define-se um grau de avanço do processo de compactação do corpo, C , ao compactá-lo até uma pressão de prensagem, P , mediante a expressão:

$$C = \frac{V_{p0} - V_p}{V_{p0}} \quad (1)$$

sendo:

V_{p0} = volume de poros do material resultante do preenchimento (m^3);

V_p = volume de poros do corpo compactado a uma pressão P (m^3);

O significado físico do grau de avanço do processo de compactação é o quociente entre o volume de poros que é eliminado a uma dada pressão e o máximo teórico que seria possível eliminar (o volume total inicial de poros).

ii) O aumento de C com P se deve a uma diminuição do volume de poros intergranulares e intragranulares. Desta forma, em qualquer momento do processo, o volume total de poros (V_p) é igual à soma do volume de poros intergranulares (V_{pg}) e do volume de poros intragranulares (V_{pp}):

$$V_p = V_{pp} + V_{pg} \quad (2)$$

Da Equação 2 e da definição de grau de avanço da compactação (Equação 1) temos que:

$$C = \frac{(V_{pg0} - V_{pg}) + (V_{pp0} - V_{pp})}{V_{p0}} \quad (3)$$

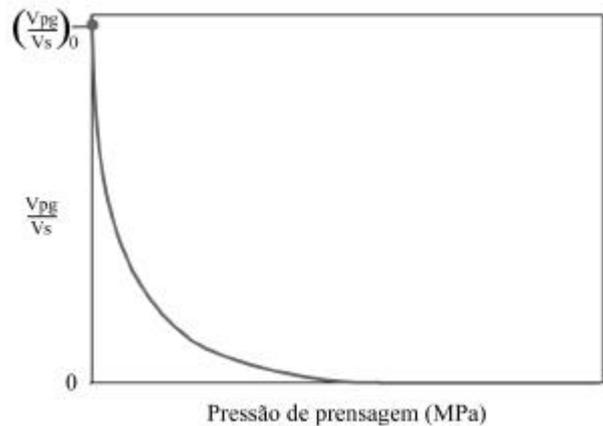


Figura 16. Variação da razão volume de poros intergranulares/volume do sólido (V_{pg}/V_s), em função da pressão de prensagem.

$$C = \frac{(V_{pg0} - V_{pg})}{V_{p0}} + \frac{(V_{pp0} - V_{pp})}{V_{p0}} \quad (4)$$

ou:

$$C = C_g + C_p \quad (5)$$

C_g representa o quociente entre o volume de poros intergranulares eliminado a uma pressão P e o volume inicial total de poros. Representa o grau de avanço da compactação devido a redução da porosidade intergranular. O significado de C_p é análogo para a porosidade intragranular.

iii) O volume total ocupado pelos poros intergranulares e seus tamanhos começam a diminuir no início da prensagem, e praticamente desaparecem a pressões moderadas (Figura 16). Os resultados experimentais sugerem que o efeito da pressão de prensagem sobre a diminuição de volume da porosidade intergranular é proporcional ao volume eliminado, ou seja:

$$-\frac{dV_{pg}}{dP} = K_1 \times V_{pg} \quad (6)$$

sendo K_1 um parâmetro representativo da compressibilidade do material em intervalos de baixas pressões e que deve estar relacionado com a resistência mecânica do grânulo.

Separando as variáveis na Equação 6:

$$\frac{dV_{pg}}{V_{pg}} = -K_1 \times dP \quad (7)$$

e integrando entre os limites:

para $P = 0 \Rightarrow V_{pg} = V_{pg0}$

e para $P = P \Rightarrow V_{pg} = V_{pg}$

$$\int_{V_{pg0}}^{V_{pg}} \frac{dV_{pg}}{V_{pg}} = -K_1 \int_0^P dP \quad (8)$$

resulta:

$$\ln \frac{V_{pg}}{V_{pg0}} = -K_1 \times P$$

$$\frac{V_{pg}}{V_{pg0}} = \exp(-K_1 \times P) \quad (9)$$

Expressão que nos indica que o volume ocupado pelos poros intergranulares no material diminui exponencialmente com o aumento da pressão de prensagem.

Da Equação 9 temos que:

$$\frac{V_{pg0} - V_{pg}}{V_{pg0}} = 1 - \exp(-K_1 \times P) \quad (10)$$

Multiplicando os dois membros da Equação 10 pela razão $a_1 = \frac{V_{pg0}}{V_{p0}}$, obtemos:

$$C_g = \frac{V_{pg0} - V_{pg}}{V_{p0}} = a_1 [1 - \exp(-K_1 \times P)] \quad (11)$$

Expressão que relaciona o grau de avanço da compactação do corpo devido exclusivamente à redução da porosidade intergranular com a pressão de prensagem. O parâmetro a_1 é o valor máximo que pode alcançar C_g e coincide com a razão entre volume de poros intergranulares/volume total de poros no início da prensagem. O parâmetro a_1 é expresso por unidade inversa da pressão e representa a compressibilidade do material no intervalo de baixas pressões de prensagem.

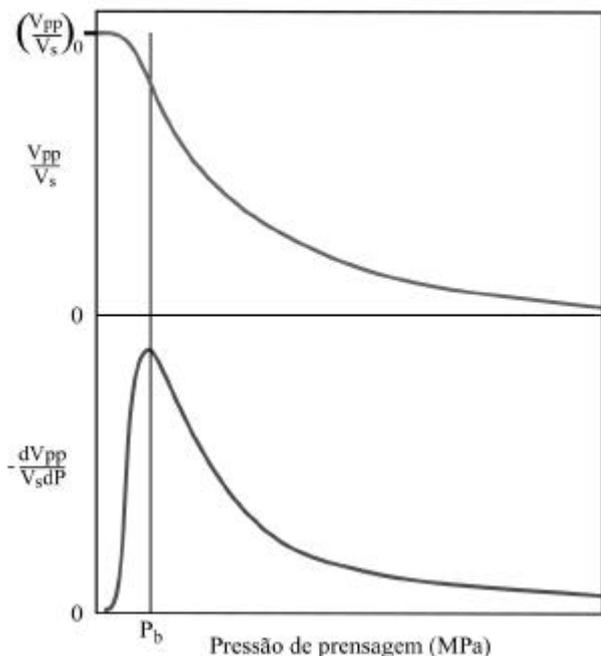


Figura 17. Variação da razão entre volume de poros intragranulares/volume do sólido (V_{pp}/V_s) em função da pressão de prensagem.

iv) O tamanho e volume dos poros intragranulares começa a ser reduzido quando se atinge uma determinada pressão de prensagem, tal como mostrado na Figura 17. Nesta figura ainda podemos ver a curva que descreve a variação decorrente do efeito da pressão de prensagem sobre a redução do volume de poros intragranulares $\frac{dV_{pp}}{dP}$

frente à variável P, curva obtida a partir da diferenciação da primeira. Observa-se claramente que esta última curva apresenta um ponto de máximo para uma determinada pressão P_b . Para valores de pressão muito menores que P_b o efeito da pressão de prensagem sobre a redução do volume de poros intragranulares é desprezível. Já a medida que nos aproximamos a P_b este efeito cresce consideravelmente. Para valores superiores à P_b o efeito vai diminuindo progressivamente conforme se aumenta a pressão. Este comportamento pode ser explicado do seguinte modo: para pressões de prensagem muito menores que P_b , as tensões de cisalhamento e compressão que atuam nos pontos de contato existentes entre as partículas não são suficientemente elevadas para promover o deslizamento entre elas, e como conseqüência incapazes de provocar a diminuição da porosidade intragranular. Já a medida que nos aproximamos de P_b , aumenta a probabilidade de que em alguns pontos de contato entre as partículas se atinja o valor crítico que provoca o deslizamento das partículas e a conseqüente redução da porosidade. Uma vez superado o valor de P_b , o efeito da pressão de prensagem sobre a redução da porosidade intragranular é cada vez mais pequeno, visto que, também, é cada vez menor a porosidade resultante.

Conforme foi dito anteriormente, os poros intragranulares nunca desaparecem completamente, remanesecendo um volume apreciável de poros, V_{pp} , inclusive em massas compactadas a pressões bastante elevadas.

Com base nos resultados entre as várias funções utilizadas para descrever os efeitos da pressão, foi escolhida uma capaz de descrever com suficiente precisão a relação

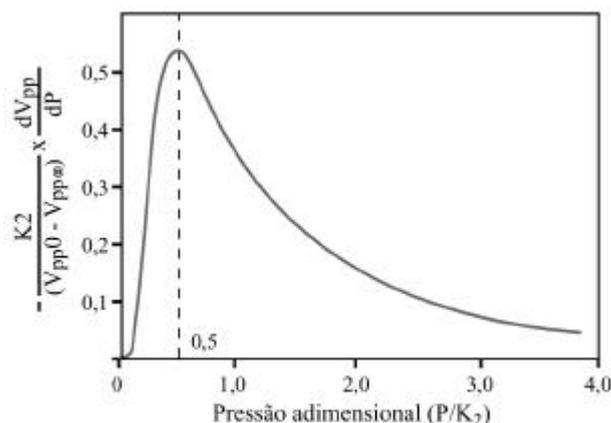


Figura 18. Representação gráfica da Equação 12.

entre $-\frac{dV_{pp}}{dP}$ e P, que se apresentou como a mais sensível possível e facilmente integrável.

A função selecionada foi:

$$-\frac{dV_{pp}}{dP} = (V_{pp0} - V_{pp\infty}) \times \frac{K_2}{P^2} \times \exp\left(-\frac{K_2}{P}\right) \quad (12)$$

O parâmetro K_2 tem unidades de pressão e a metade de seu valor é igual à pressão em que a redução da porosidade intergranular é máxima, P_b (Figura 18).

A principal vantagem na utilização da Equação 12, quando comparada à outras que também contém termos exponenciais, é a facilidade de integração e a sensibilidade da equação resultante. Separando as variáveis da Equação 12:

$$-\frac{dV_{pp}}{(V_{pp0} - V_{pp\infty})} = \frac{K_2}{P^2} \times \exp\left(-\frac{K_2}{P}\right) \times dP$$

e integrando entre os limites:

para $P = 0 \Rightarrow V_{pp} = V_{pp0}$

e para $P = P \Rightarrow V_{pp} = V_{pp}$

$$\int_{V_{pp0}}^{V_{pp}} -\frac{dV_{pp}}{(V_{pp0} - V_{pp\infty})} = \int_{P=0}^{P=P} \frac{K_2}{P^2} \times \exp\left(-\frac{K_2}{P}\right) \times dP$$

obtem-se:

$$\frac{V_{pp0} - V_{pp}}{V_{pp0} - V_{pp\infty}} = \exp\left(-\frac{K_2}{P}\right) \quad (13)$$

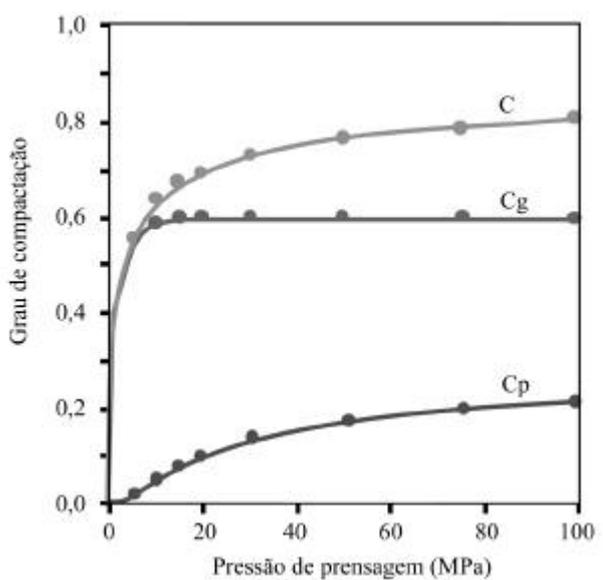


Figura 19. Comparação entre o modelo proposto e os resultados obtidos experimentalmente. Massa de revestimentos cerâmicos. Umidade de prensagem: 0,055 kg água/kg s.s. (~ 5,5%).

Multiplicando os dois primeiros membros da Equação 13 pela razão $a_2 = \frac{V_{pp0} - V_{pp\infty}}{V_{p0}}$ e tendo em conta que $K_2 = 2P_b$ temos:

$$C_p = \frac{V_{pp0} - V_{pp}}{V_{p0}} = a_2 \times \exp(-2 P_b \times P) \quad (14)$$

Expressão que relaciona o grau de avanço da compactação unicamente devido à eliminação dos poros intragranulares, C_p , com a pressão de prensagem. O parâmetro a_2 corresponde ao valor máximo de C_p , que coincide com a razão entre o volume máximo de poros intragranulares que podem ser eliminados/volume total de poros existente no início da prensagem. O parâmetro P_b representa a pressão em que se dá a máxima redução da porosidade intragranular e deve estar relacionado com a resistência mecânica do grânulo.

Das Equações 5, 11 e 14 obtém-se, finalmente:

$$C = a_1 \times (1 - \exp(K_1 \times P)) + a_2 \times \exp\left(\frac{-2 P_b}{P}\right) \quad (15)$$

Equação que relaciona o grau de avanço da compactação C com a pressão de prensagem. Na Figura 19 são representados, para uma massa industrial obtida por atomização de uma suspensão argilosa, os valores de C, C_g e C_p dos corpos de prova prensados, em função da pressão de prensagem. Os resultados foram comparados aos previstos para as Equações 11, 14 e 15, utilizando-se o valor determinado experimentalmente para a_1 . Como se pode ver, o resultado é bastante preciso.

Para determinar a variação da compactação em função da pressão de prensagem, o chamado diagrama de compac-

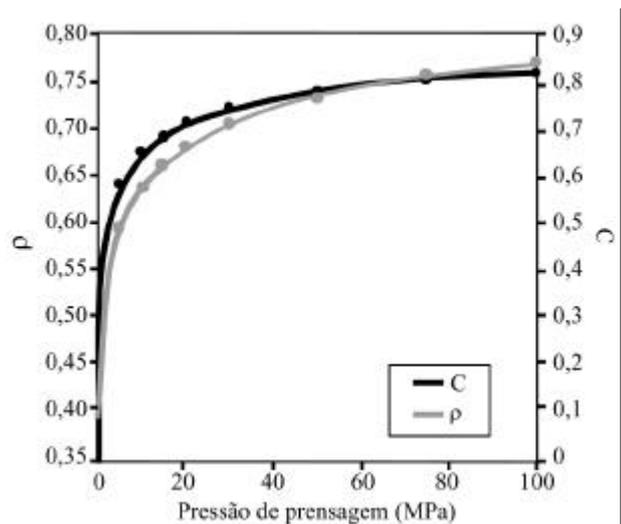


Figura 20. Variação da densidade relativa (ρ) e do grau de avanço da compactação (C) em função da pressão de prensagem, de acordo com o modelo proposto. Massa atomizada para revestimentos cerâmicos. Umidade de prensagem de 0,055 kg água/kg. s.s.

tação, é preciso determinar a relação entre esta característica (densidade relativa), e o grau de avanço da compactação, C.

Para sua dedução se parte do princípio da aditividade dos volumes, ou seja, em qualquer estágio do processo, o volume aparente do corpo, V, é igual à soma dos volumes do sólido, V_s , e do volume dos poros, V_p .

$$V = V_p + V_s \text{ ou } V_p = V - V_s \quad (16)$$

Ao substituímos a Equação 16 na Equação 1 da definição do grau de avanço da compactação temos a relação:

$$C = \frac{(V_0 - V_s) - (V - V_s)}{V_0 - V_s} \quad (17)$$

Dividindo a Equação 17 pelo volume de sólidos temos que:

$$C = \frac{\frac{V_0}{V_s} - \frac{V}{V_s}}{\frac{V_0}{V_s} - 1} \quad (18)$$

A relação entre a densidade relativa (ρ), volume aparente (V) e volume de sólidos (V_s) é:

$$\rho = \frac{V_s}{V} \quad (19)$$

Ao introduzirmos a Equação 19 na Equação 18, obtém-se:

$$C = \frac{\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho}}{\frac{1}{\rho_0} - 1}$$

Reordenando os termos:

$$C = \frac{\rho - \rho_0}{\rho (1 - \rho_0)}$$

Isolando ρ :

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - C (1 - \rho_0)} \quad (20)$$

Conforme a Figura 20, a variação de C e ρ com a pressão de prensagem são bastante parecidas.