

A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial. Parte IV: Extração da Peça e Resistência Mecânica a Verde

J.L. Amorós Albaro

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*

A etapa de extração

A compressão elástica da massa se inicia no estágio intermediário do processo de compactação e aumenta consideravelmente no estágio final, conforme visto nos artigos anteriores. Esta energia elástica, que permanece armazenada na peça durante a fase de compactação começa a ser dissipada à medida que se retira a carga e extrai-se a peça, provocando um aumento de suas dimensões. Esta expansão após a prensagem, chamada de expansão de extração, se dá tanto na direção em que se aplicou a carga durante a compactação como também na direção perpendicular à aplicação da carga. Apesar de uma pequena expansão de extração ser necessária, pois favorece o descolamento entre o punção e a peça durante a extração, se o aumento das dimensões se dá de forma excessiva ocasiona com frequência problemas e defeitos nas peças, conforme veremos adiante. Considera-se aceitável uma expansão de extração linear inferior a 0,75%.

A expansão de extração sempre aumenta com a pressão de prensagem, uma vez que com o aumento da pressão, aumentam o número de pontos de contato entre as partículas por unidade de volume e o valor da deformação elástica em cada um dos pontos de contato.

O valor da expansão de extração da peça, bem como o efeito que a pressão de prensagem exerce sobre este valor, dependem das características dos aglomerados que compõe a massa e também do ciclo de prensagem utilizado.

De maneira geral, demonstra-se que a expansão de extração diminui à medida que se aumenta a plasticidade ou ductilidade dos grânulos, pelo aumento do teor de água ou qualquer outro tipo de plastificante (Figura 40).

Observa-se também uma diminuição da expansão de extração à medida que se reduz a velocidade de aplicação da carga ou se aumenta o tempo de aplicação da pressão máxima do ciclo de prensagem. Este efeito, que é tanto mais acentuado quanto mais curta é a duração do ciclo de prensagem, se deve ao fato de que quanto mais se aumenta o tempo do ciclo de prensagem, por um lado se favorece o

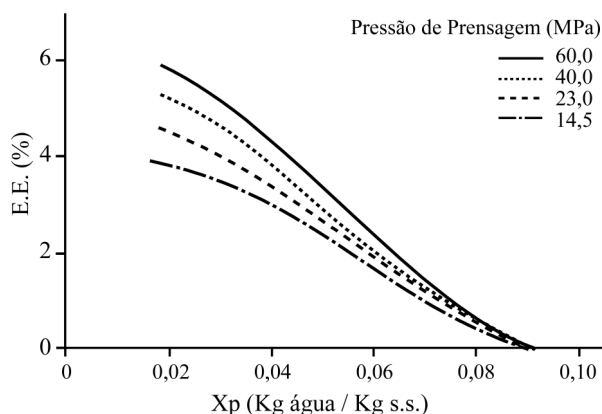


Figura 40. Variação da expansão de extração (E.E.) da peça em função do teor de umidade do aglomerado (X_p) para diferentes pressões de prensagem. Massa para fabricação de revestimentos.

reordenamento das partículas, que alcançam posições mais estáveis, e por outro lado, reduz-se a quantidade de ar aprisionado no interior do corpo.

Na prensagem uniaxial esta fase é especialmente crítica, já que quando se anula a pressão de prensagem, a energia elástica armazenada na peça passa a exercer uma força normal sobre a parede do molde. A fricção entre as superfícies do molde e da peça determina uma tensão de cisalhamento, Γ , à qual a peça estará submetida durante a etapa de extração.

Esta tensão de cisalhamento, Γ , que deve ser a menor possível, depende do valor do coeficiente de fricção do sistema peça/parede do molde, μ , analisado anteriormente, da energia elástica armazenada na peça, diretamente relacionada com a expansão de extração, que acabamos de comentar, e também da velocidade de extração (Figura 41).

O teor de umidade dos grânulos, ao atuar como plastificante, que reduz a energia elástica armazenada na peça, e também como lubrificante, que reduz a fricção na interface peça/molde, exerce um efeito marcante sobre a tensão de cisalhamento a que fica submetida a peça durante a etapa de extração, como se pode comprovar na Figura 42.

Resistência mecânica das peças a verde

As relações que se estabelecem diretamente entre as variáveis de operação de uma determinada etapa do processamento e as propriedades de um produto intermediário ou final são totalmente empíricas e válidas somente para cada sistema concreto estudado. A influência das variáveis da operação de prensagem sobre a resistência mecânica da peça prensada deve ser quantificada e analisada baseando-se no efeito que as variáveis de operação exercem sobre as características da peça prensada, analisadas na Parte III, e na relação existente entre estas últimas e a resistência mecânica da peça prensada. Os dois tipos de relação,

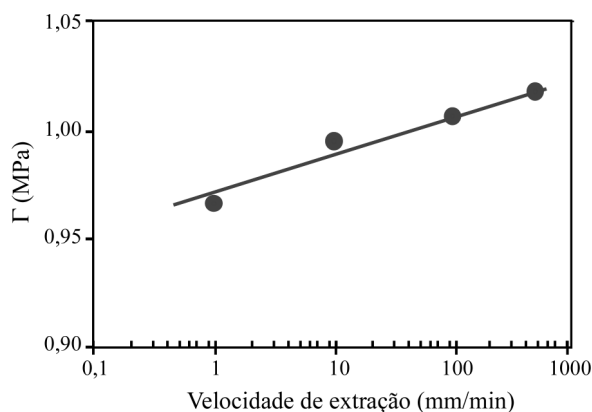


Figura 41. Variação da tensão de cisalhamento (Γ) em função da velocidade de extração da peça. Massa para fabricação de revestimentos. Teor de umidade dos aglomerados de 0,06 Kg água / Kg s.s.

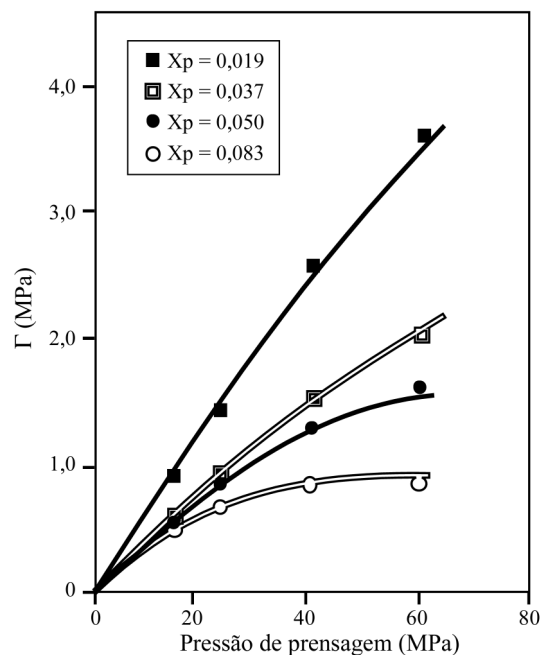


Figura 42. Variação da tensão de cisalhamento peça/molde (Γ) em função da pressão de prensagem. Efeito do teor de umidade dos grânulos, X_p (Kg água / Kg s.s.). Massa para fabricação de revestimentos.

variáveis de operação – características da peça, e características da peça–resistência mecânica já tem um fundamento e um significado físicos claros, o que faz com que a validade de suas aplicações seja mais geral.

Para estabelecer uma relação entre a resistência mecânica da peça prensada e as suas características mais importantes, como compacidade, teor de umidade, etc. é necessário que se conheça previamente o mecanismo de fratura da peça.

Mecanismo de fratura

Ao determinar, através de um ensaio de flexão em três pontos, a relação entre carga e deformação de peças prensadas a verde (antes da secagem), parcialmente secas ou totalmente secas (após secagem), obtém-se uma curva de formato padronizado, como a apresentada na Figura 43. Nota-se uma primeira região, linear, na qual o comportamento do material é elástico, e a deformação da peça é proporcional à carga aplicada, e reversível. O ponto em que começa a desfigurar-se esta proporcionalidade define o limite elástico do material, LE, uma vez que ultrapassado este limite, qualquer deformação imposta ao corpo será permanente (plástica).

Ainda que dependente da região linear, que é proporcional ao módulo de elasticidade do material, da deformação máxima suportada pela peça até sua ruptura ou deformação crítica e ainda da carga de ruptura, que dependem das características do material, a forma da curva, bem como sua interpretação, é a mesma para todas as peças a verde independente de suas características (Figura 44).

O limite elástico indica o estado de tensões em que se inicia o aparecimento e propagação de trincas desde a superfície até o interior da peça. A trinca se inicia em algum dos defeitos superficiais da peça (interface entre grânulos) de tamanho c_0 , que atua como ponto de concentração de

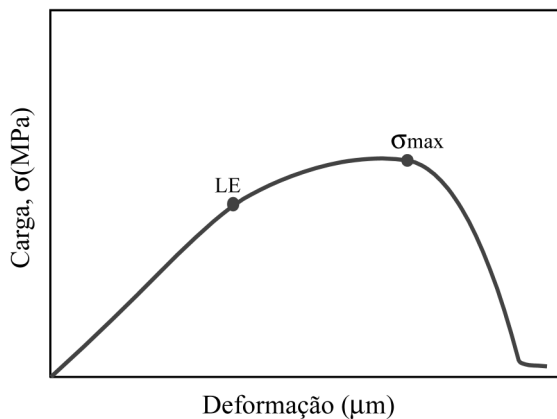


Figura 43. Diagrama carga-deformação de peças a verde.

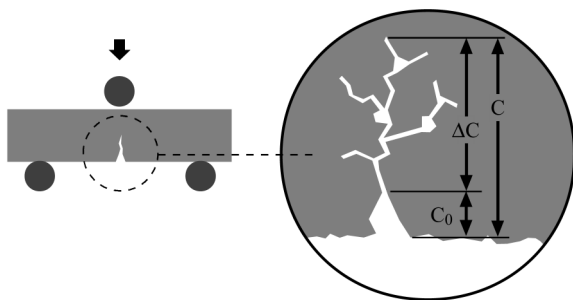


Figura 44. Mecanismo de fratura de peças prensadas a verde.

tensões. Esta trinca pode inclusive ramificar-se, provavelmente, ao longo dos contornos dos grânulos, que ainda que muito deformados estão presentes na peça, dando origem a múltiplas trincas. Finalmente, quando o sistema de trincas atinge um tamanho crítico, c , ocorre a fratura catastrófica da peça. Efetivamente, este material apresenta um comportamento semifrágil, uma vez que sua fratura necessita da propagação e crescimento de trincas pré-existentes. Ainda, as peças apresentam deformação crítica e módulo de Weibull elevados, fatores que também são consistentes com o mecanismo proposto.

Relação entre resistência mecânica e características da peça

A teoria de Griffith não é rigorosamente válida para materiais semifrágil, uma vez que foi desenvolvida para materiais totalmente frágeis. Entretanto, sua aplicação, com as devidas modificações, à análise do comportamento de peças a verde, de forma qualitativa, indica que a resistência mecânica da peça, S , aumenta à medida que se elevam a área efetiva de contato entre os aglomerados e a força de adesão entre estes por unidade de superfície de contato, ou melhor, a resistência mecânica da fase ligante, S_0 , uma vez que ambas as características determinam a resistência do material à propagação de trincas. Por outro lado, a resistência mecânica da peça, S , diminui à medida que se aumenta o tamanho dos aglomerados que compõe a massa, já que o tamanho do defeito que dará origem à trinca, c_0 , há de estar relacionado com esta última característica.

Influência da resistência mecânica da fase ligante. Efeito do teor de umidade.

A resistência mecânica da fase ligante, S_0 , depende da natureza e proporção do ligante propriamente dito e do plastificante, de forma geral, bem como do teor de umidade da peça em particular. Independentemente de se tratar de composições argilosas ou não-argilosas, a resistência mecânica da fase ligante diminui à medida que se aumenta (de forma exponencial) o teor de umidade da peça, X , comportamento similar ao apresentado pela pressão de fluência dos grânulos em relação a esta mesma variável (Figura 23 e 28, Parte III). Como consequência, para uma determinada composição inicial, a razão entre os valores de resistência mecânica da peça com um teor de umidade determinado, S , e a respectiva resistência mecânica da peça seca, S_s , deve diminuir à medida que se aumenta o teor de umidade, X , também de forma exponencial. Além disto, esta relação deve ser independente das variáveis de operação empregadas na conformação das peças. Ambos resultados são confirmados pela Figura 45.

Desta forma, a influência do teor de umidade da peça sobre sua resistência mecânica pode ser descrita a partir de uma equação do tipo:

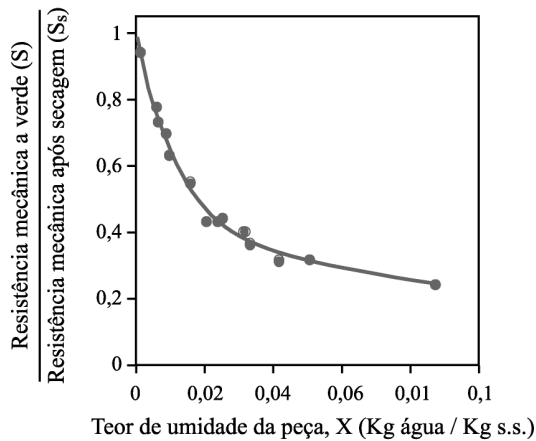


Figura 45. Variação da relação resistência mecânica a verde (S) / Resistência mecânica após secagem (S_s).

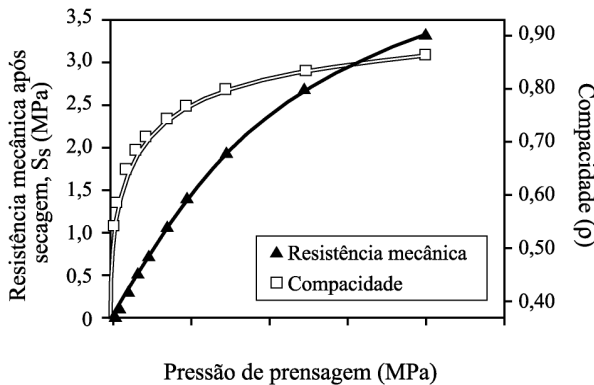


Figura 46. Variação da compactidade e da resistência mecânica após secagem em função da pressão de prensagem. Massa para fabricação de revestimentos. Teor de umidade da massa $X_p=0,06$.

$$\frac{S}{S_s} = a X^{-b} \quad (30)$$

sendo a e b duas constantes empíricas, que dependem das matérias-primas da massa.

Influência da área efetiva de contato entre os grânulos. Efeito da compactidade da peça e da pressão de fluência dos grânulos da massa.

À medida que se aumenta a compactidade da peça, com o aumento da pressão de prensagem, aumenta-se também a área efetiva de contato entre os grânulos, fato que se traduz em um aumento da resistência mecânica da peça (Figura 46).

Por sua vez, a relação entre a resistência mecânica e a compactidade depende da pressão de fluência do grânulo no momento da prensagem, como pode ser visto na Figura 47. De fato, para uma mesma compactidade e teor de umidade da peça (neste caso peças secas), as peças mais fortes são aquelas que foram obtidas a partir dos grânulos mais úmi-

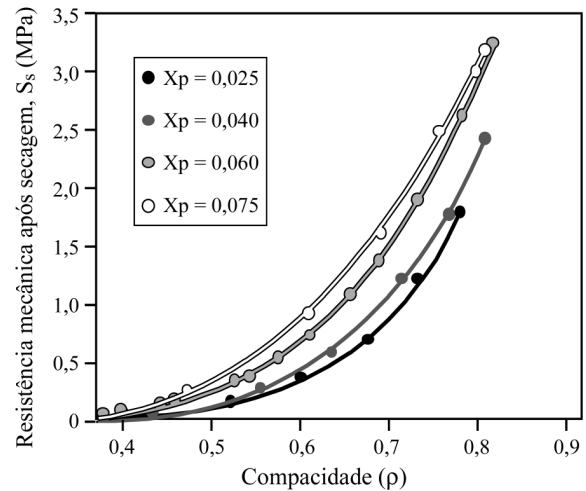


Figura 47. Relação entre a resistência mecânica após secagem e a compactidade da peça. Efeito do teor de umidade dos aglomerados, X_p (Kg água / Kg s.s.). Massa para fabricação de revestimentos.

Tabela III. Efeito do tamanho do aglomerado sobre a resistência mecânica após secagem e sobre a rugosidade superficial da peça.

Fração Granulométrica	Resistência mecânica (MPa)	Compactidade	Rugosidade	
			Média	Desvio
125-200 μm	3.2	0,70	15,7	1,5
300-400 μm	2.9	0,70	19,9	2,8
500-750 μm	2.6	0,70	22,2	5,5

dos (mais deformáveis, de menor pressão de fluência) e, portanto, obtidos a pressões de prensagem mais baixas para manter a compactidade constante. Isto se deve ao fato de que conforme se diminui a pressão de fluência dos grânulos, estes vão se tornando cada vez mais plásticos e deformáveis, o que se traduz em um aumento efetivo da área de contato entre os aglomerados, ainda que seja reduzida a pressão de prensagem para manter constante a compactidade entre as peças.

Para revestimentos cerâmicos foi demonstrado que o efeito conjunto da compactidade da peça e da pressão de fluência dos grânulos sobre a resistência mecânica pode ser adequadamente descrito através de uma equação do tipo:

$$S = S_{\max} \times \exp [-d \times P_f \times (1 - \rho)] \quad (31)$$

sendo: e , d , e S_{\max} três constantes empíricas características do material.

Influência do tamanho do defeito em que se inicia a fratura. Efeito do tamanho médio de grânulo da massa.

De uma maneira geral se demonstra que, mantendo-se constante as demais características da peça (compactidade, teor de umidade (X), pressão de fluência do aglomerado

(P_f)), a resistência mecânica da peça é tanto maior quanto menor é o tamanho médio dos aglomerados, G , como pode ser visto na Tabela III. Isto se deve a que o tamanho do defeito iniciador da trinca, C_o , geralmente superficial, aumenta com o tamanho médio do grânulo, fato que se pode comprovar através da análise da rugosidade da superfície das peças prensadas.

O efeito do tamanho inicial dos grânulos, G , sobre a resistência mecânica da peça pode ser descrito satisfatoriamente mediante o emprego de uma equação do tipo:

$$S = f \times G^{-g} \quad (32)$$

sendo f e g duas constantes empíricas.