

## IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO DE EMPACOTAMENTO COMPRESSÍVEL DE PARTÍCULAS PARA A OTIMIZAÇÃO DE MISTURAS GRANULARES.

**Felipe N. A. da Silva<sup>1</sup>; Anderson de S. M. Gadéa<sup>2</sup>; Koji de J. Nagahama<sup>3</sup>**

1. Bolsista FABESP, Graduando em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: [felipearaujo.uefs@gmail.com](mailto:felipearaujo.uefs@gmail.com)

2. Orientador, Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: [agadea@uefs.br](mailto:agadea@uefs.br)

3. Co-Orientador, Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: [kjnagahama@uefs.br](mailto:kjnagahama@uefs.br)

**PALAVRAS-CHAVE:** MEC, Dosagem científica, Empacotamento compressível.

### INTRODUÇÃO

Na literatura são encontrados vários métodos de dosagem de concreto, dentre os mais conhecidos, estão o do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) e BSI (Norma Britânica). Contudo, nenhum destes métodos vislumbra a utilização de agregados reciclados, cuja aplicação é muitas vezes restrita as aplicações não estruturais. Neste trabalho, propõe-se a implementação do Método do Empacotamento Compressível (MEC) - base para a confecção do método de dosagem científica proposto *de Larrard (1999)*, cuja eficiência já foi testada em diversos concretos com resistências normais, de alto desempenho, com pós reativos, auto-adensáveis, entre outros.

O método proposto por *de Larrard (1999)* apresenta uma abordagem totalmente diferenciada dos métodos tradicionais. Sua conceituação baseia-se num modelo de empacotamento de partículas para a otimização de misturas granulares buscando a máxima compacidade possível, acoplado a um conjunto de modelos de comportamento para o concreto (estado fresco e endurecido). Assim, faz-se a dosagem a partir da fração volumétrica otimizada obtida e, então, torna-se possível a predição das propriedades do concreto.

Este método divide-se em dois módulos distintos: empacotamento virtual e empacotamento real. O primeiro módulo corresponde a um modelo matemático que possibilita a obtenção da máxima compacidade possível de uma mistura granular empilhando todos os seus grãos sem considerar alterações em sua forma. Por outro lado o empacotamento real é obtido por um procedimento físico de compactação dos grãos (vibração, apiloamento, molhagem etc.). Este último está correlacionado ao empacotamento virtual por meio de um índice (K) que caracteriza o procedimento físico de empacotamento.

### METODOLOGIA

A implementação deste trabalho foi dividida em 4 etapas as saber: **i)** Revisão de literatura; **ii)** Análise do empacotamento virtual; **iii)** Análise do empacotamento real e **iv)** Avaliação programa implementado.

Inicialmente firmou-se qual seria o ambiente de desenvolvimento (Matlab) e, posteriormente, foram empreendidos no sentido esforços para a familiarização do bolsista ao Matlab e aos novos conceitos que se apresentam. Neste contexto foi realizada a revisão de literatura, enfocando-se nos métodos de dosagem e no empacotamento granular.

A partir da familiarização do bolsista, foram implementados o sistema básico no qual era possível simular o empacotamento virtual; isto é, perfeito. Inicialmente, para misturas binárias que, posteriormente, foi expandido para tratar do empacotamento de misturas polidispersas.

O estudo de misturas reais (empacotamento real) foi tratado de maneira análoga ao do empacotamento virtual. Vencida etapa de entendimento de como se comportam as misturas reais, foram executadas as alterações necessárias ao programa para que este fosse capaz de prever o comportamento real de misturas binária e, posteriormente, de misturas polidispersas.

Uma vez montado o programa, este foi testado através de testes paramétricos que puderam apontar a sua eficiência.

## ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O desenvolvimento das rotinas seguiu uma ordem determinada pelo número de classes granulares constituintes e da consideração dos índices de efeito de afastamento e parede, efeitos gerados pela interação entre os grãos, que tendem a diminuir a compacidade final da mistura. Em cada tipo de mistura foi calculada a classe de grãos dominante, e feita ordenação em ordem decrescente dos diâmetros de cada classe.

Inicialmente foram analisadas as misturas binárias, sem interação, onde o arranjo global de grãos da classe de maior diâmetro não foi perturbado pela presença dos grãos de diâmetro menor ( $d_1 \gg d_2$ ). A contribuição da classe um será constante de valor  $\beta_1$  e a contribuição da classe dois será igual  $\theta_2$ , variando sempre entre zero e o valor determinado para o qual a classe um deixa de ser dominante. Para efeitos de cálculo utilizou-se grãos esféricos, de compacidade  $\beta=0.74$ . O valor máximo da compacidade da mistura ocorre no ponto onde todos os vazios da classe dominante são preenchidos pelos grãos da classe menor. Para os valores exemplificados este ponto ocorre para a fração volumétrica  $y_2=0.205$ , onde ocorre mudança de dominância.

Considerando os efeitos de interação, que ocorrem quando há uma proximidade dos diâmetros dos grãos ( $d_1 > d_2$ ), o diâmetro dos grãos da classe dois será maior que a dimensão dos vazios deixados pelo arranjo da classe um. Haverá, portanto, um afastamento provocado pela introdução de um novo grão ( $d_2$ ) na mistura. Se por outro lado há inclusão de um grão de diâmetro  $d_1$  em um empacotamento de grãos finos, ocorrerá um aumento de vazios na sua vizinhança; estes dois fenômenos são chamados, respectivamente, de efeito de afastamento ( $a_{12}$ ) e efeito de parede ( $b_{21}$ ).

A Figura 1 exemplifica os dois casos abordados, exemplificando a mudança nos valores da compacidade em função da variação dos valores da fração volumétrica  $y_2$ , a fim de comparar o comportamento do empacotamento com ou sem a influência de interação. A curva inferior representa o empacotamento com efeito de interação total ( $d_1 = d_2$ ) o que implica em um valor dos coeficientes de afastamento e parede iguais a um. A curva intermediária foi obtida calculando a compacidade levando em consideração uma interação parcial ( $d_1 > d_2$ ) e valores de  $a_{12}=b_{21}=0.5$ .

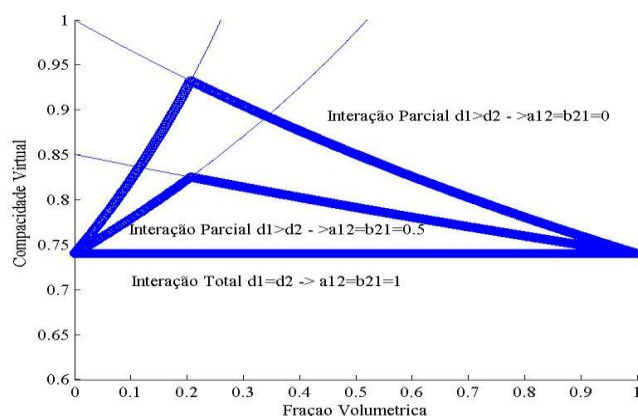


Figura 1: Evolução da compacidade de uma mistura binária para os diversos tipos de interação.

Para o cálculo de misturas compostas por mais de duas classes, uma destas será a classe dominante. Assim, se utilizamos uma mistura de grãos de três classes com:  $\beta=0.74$ ,  $d_1=0.8$ ,  $d_2=0.5$ ,  $d_3=0.2$ ,  $y_1=0.3$ ,  $y_2$  variando entre 0 e 0.5 e  $y_3$  como o restante da fração volumétrica da mistura. Como mostrado na Figura 2, a compacidade varia em função da variação da fração volumétrica do material dois, atingindo uma descontinuidade brusca no gráfico no ponto onde esta classe assumiu dominância do empacotamento.

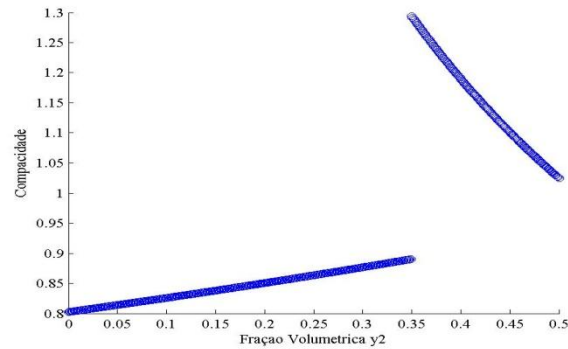


Figura 2: Evolução da compacidade de uma mistura polidispersas.

Após os cálculos realizados ainda na fase virtual, passa-se a relacionar o empacotamento real e o empacotamento virtual, que será dada a partir de um índice  $K$ , que caracteriza o procedimento experimental na realização do empacotamento. Este índice portanto mede em que extensão a compacidade virtual se aproxima da real. Este índice é dado em função da contribuição de cada classe de grão, e esta relacionado a compacidade real de uma mistura ( $\Phi$ ). Diversos protocolos os valores de  $K$  foram determinados por *de Larrard (1999)*, e serão utilizados durante o experimento. O cálculo da compacidade real será feito através da equação (1), resultado do desenvolvimento da relação entre o protocolo de empacotamento e a compacidade da mistura e inicialmente tratada para uma mistura binária:

$$f(\Phi) = \frac{\gamma_1/\beta_1}{\left(\frac{1}{\Phi} - \frac{1}{\gamma_1}\right)} + \frac{\gamma_2/\beta_2}{\left(\frac{1}{\Phi} - \frac{1}{\gamma_2}\right)} \quad (1)$$

Para valores de  $y_1=0.8$ ,  $y_2=0.2$ ,  $d_1=10$ ,  $d_2=1$ ,  $\beta_1=\beta_2=0.74$  e  $K=9$ , obteve-se o gráfico mostrado na Figura 3. É importante salientar que valores desejados para  $\Phi$  são raízes da equação 1; isto é,  $\Phi_1$  e  $\Phi_2$ . Surgirão outros dois pontos que merecem destaque, a saber:  $\Phi_a$  e  $\Phi_b$ , que correspondem aos pontos onde há descontinuidade da função, e que correspondem a  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$ , respectivamente. Como por definição, a compacidade virtual é sempre maior que a compacidade real, limita-se o intervalo de busca até  $\gamma_1$ .

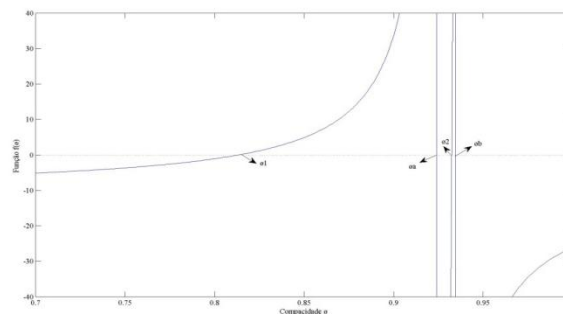


Figura 3: Evolução da função  $f(\Phi)$  da equação 1.

Este mesmo procedimento por ser adotado para misturas compostas por inúmeras classes de grãos, pois a classe dominante está sempre associada ao  $\gamma_1$ . Assim, a compacidade da mistura pode ser determinada através da equação 2.

$$\frac{1}{\gamma_1} = \frac{1}{\Phi_1} \quad (2)$$

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados fornecidos e simulados no decorrer da pesquisa ajustam-se aos resultados apresentados na literatura, confirmando o sucesso obtido na implementação do código do programa.

## REFERÊNCIAS

**de Larrard, F.** – Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach, Modern Concrete Technology Series, vol. 9, E&FN SPON, London, 1999.