

A RELAÇÃO K ENTRE AS PRESSÕES HORIZONTAIS E VERTICAIS EM SILOS.

Carlito CALIL¹ Junior.

RESUMO: Este trabalho tem por finalidade o estudo teórico e experimental da relação entre as pressões horizontais e verticais em silos, o valor de K. Para esta finalidade foi realizada uma pesquisa bibliográfica do valor de K proposto pelas principais normas internacionais em silos e comparado com os valores experimentais determinados em um ensaio em modelo reduzido. A variabilidade dos resultados encontrados mostra a importância e necessidade do dimensionamento de silos pelo método dos estados limites.

PALAVRAS-CHAVE: Pressões, silos, relação K

ABSTRACT: The aim of this work is the theoretical and experimental study of the ratio between the horizontal and vertical pressures in silos, that is the K value. To this purpose a review of K value proposed by the principal international codes in silos are made and compared with experimental values determined in a silo model. The results variability show the importance and necessity to design silos by the method of limit states.

KEYWORDS: Pressures, silos, K ratio

INTRODUÇÃO: A relação entre a pressão horizontal e a vertical em qualquer ponto de uma massa granular é definida como a relação K. Este é um dos parâmetros necessários para o cálculo das pressões que o produto exerce sobre as paredes e fundo de um silo. Os três estados de tensão associados com K são referidos como os estados ativo, passivo e em repouso. Os dois primeiros são o resultado do movimento da parede, para fora e para dentro do produto armazenado, respectivamente, enquanto o terceiro ocorre quando a estrutura de contenção é indeslocável e evita a deformação lateral na periferia do produto, como é o caso das paredes dos silos. O estado em repouso, que é objeto deste estudo, varia entre os valores ativo (valor inferior) e passivo (valor superior) e precisa ser determinado para os produtos a serem armazenados. A norma britânica BMHB(1985) define dois valores para K sendo um valor inferior $K_l = 0,25$ para cálculo das pressões verticais e um valor superior $K_u = 0,60$ para cálculo das pressões horizontais. Especifica que se a parede é muito rugosa, o valor superior de K_u deve ser tomado igual a 0,75. A norma européia, ENV 1991-4 (1991), fornece o valor de K em uma tabela para dez produtos. Para os produtos que não constam nesta tabela, o valor de K pode ser determinado experimentalmente por metodologia definida em anexo desta norma, usando o equipamento de Jenike. Os valores fornecidos na tabela variam de 0,45 a 0,55. A norma canadense, CFBC(1983), fornece o valor de K em uma tabela para oito produtos, em função da rugosidade da parede. Para produtos granulares apresenta o valor de 0,4 para paredes lisas e 0,6 para paredes rugosas.

¹ Prof. Dr. da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Dr. Carlos Botelho, 1465, CEP 13560-970 - São Carlos, SP, Fone 2749263, Email: CALIL@SC.USP.BR

A norma alemã, DIN 1055(1987), define o valor de K pela expressão: $K = 1,2 (1 - \sin \phi_1)$; ou seja, pelo coeficiente de empuxo de solos com um fator 1,2. O fator 1,2 foi escolhido para garantir que em pequenas alturas do produto armazenado, ou seja, na parte superior do silo, resultem curvas de cargas mais completas. A norma americana, ACI 313(1977), define o seguinte valor de K:

$$K = \frac{1 - \sin \phi_1}{1 + \sin \phi_1}$$

A norma francesa (SNBATI, 1975) define dois valores para K, em função dos estados de carregamento e descarga central. Para o carregamento do silo adota a seguinte expressão:

$$K_1 = \frac{1 - m \sin \phi_1}{1 + m \sin \phi_1} \cos^2 \phi_w$$

sendo: $m = \sqrt{1 - (\tan \phi_w / \tan \phi_1)}$

Para descarga central adota a seguinte equação: $K = 1,4 \times K_1$

AS3774 (1990) adota a seguinte expressão para a determinação do valor de K:

$$K = \frac{1 + \sin^2 \phi_e - 2 \sqrt{(\sin^2 \phi_e - \mu^2 \cdot \cos^2 \phi_e)}}{4 \mu^2 + \cos^2 \phi_e} \geq 0,35$$

sendo: $\mu = \tan \phi_w$

MATERIAL E MÉTODOS: Para a determinação experimental da relação K, foi construído um silo em modelo reduzido, de seção transversal quadrada de 33 cm de lado e altura de 198 cm, fundo plano, instrumentado com extensômetros elétricos para medidas das pressões horizontais e verticais (CALIL,1982,1989). Foram realizados ensaios em função de quatro relações altura/lado, ou seja, 6,0;3,0;1,5 e 0,75. O material usado para construção das paredes e do fundo do modelo foi placas de plástico transparente. O produto granular usado nos ensaios foi o alpiste. Para a comparação dos valores teóricos com os experimentais foram determinados os ângulos de atrito interno e de atrito com a parede do modelo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: Os valores dos ângulos de atrito interno e do ângulo de atrito com a parede(limite superior/limite inferior), determinados no aparelho de Jenike, foram respectivamente 33/30 graus e 12/10 graus, respectivamente. Estes valores aplicados nas fórmulas propostas pelas normas, fornecem:

BMHB: carga = 0,25 e descarga = 0,60.

ENV: carga = 0,45 e descarga = 0,55.

CFBC: carga = 0,40 e descarga = 0,40.

DIN: carga = 0,55 e descarga = 0,60

ACI: carga = 0,29 e descarga = 0,33.

SNBATI: carga = 0,40 e descarga = 0,56.

AS3774: carga = 0,35 e descarga = 0,40.

EXPERIMENTAL: carga = 0,36 e descarga = 0,46.

Comparando-se os resultados teóricos e experimentais, pode-se observar que a norma australiana apresenta os valores mais próximos aos experimentais e considera o efeito do ângulo de atrito com a parede na determinação de K.

CONCLUSÕES: Os valores de K, para produtos granulares, de fluxo livre, não variam em função da relação altura/lado do silo, pois os ângulos de atrito não variam com a compactação do produto. Na descarga, estes produtos apresentam um valor maior de K, pois há um aumento das pressões horizontais e uma diminuição das pressões verticais. Pela análise geral dos resultados teóricos e experimentais obtidos pode-se concluir que os valores propostos pela maioria das normas são conservadores e que a variabilidade dos valores propostos exige uma análise estrutural pelo método dos estados limites de dimensionamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Recommended Practice for Design and Construction of Concrete Bins, Silos and Bunkers for Storing Granular Materials (ACI 313-77)**. Revised 1983, 87p, 1977.

BMHB. British Materials Handling Board. **Draft Code of Practice for the Design of Silos, Bins, Bunkers and Hoppers**. Inglaterra, 101p., 1985.

CALIL, C.Jr.. **Sobrepresiones en las Paredes de los Silos para Almacenamiento de Productos Pulverulentos Cohesivos**. Tese de Doutorado. Escola Técnica Superior de Engenheiros Industriais de Barcelona. Universidade Politécnica de Barcelona. Orientador: Prof. Juan Ravenet. Barcelona, Espanha., 318 p., 1982.

CALIL, C.Jr. **Recomendações de Cargas para o Dimensionamento de Silos**. Relatório de pesquisa de pós-doutorado. São Carlos, SP, 106 p., 1989.

CFBC . **Canadian Farm Building Code**. Associate Committee on the National Building Code. National Research Council of Canada. Ottawa., 25 p., 1983.

DIN 1055. **Lastannahmen fur Bauten, Blatt 6, Lasten in Silozellen**. Alemanha, 12p., 1987.

AS 3774. **Loads on Bulk Solids Containers**. Standards Australia - Austrália, 62p., 1990.

SNBATI . **Reglas para Proyecto y Calculo de Silos de Hormigón**. Sindicato Nacional del Hormigón Armado y Técnicas Industrializadas, França, 47 p., 1975.