



**II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**II NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING**  
12 a 16 de Agosto de 2002 - João Pessoa – PB

**OTIMIZAÇÃO DO TEMPO E DA ROTAÇÃO NA HOMOGENEIZAÇÃO DE GRANULADOS COM DIFERENTES DIÂMETROS**

**Célio Losnak**

Universidade Estadual Paulista – Departamento de Mecânica da FEB/UNESP-Av Luiz Edmundo Carrijo Coube s/n - CEP 17033-360-Bauru - SP Fone (14) 221 6119- Bauru.  
e-mail: [losnak@feb.unesp.br](mailto:losnak@feb.unesp.br)

**Luiz Eduardo de Angelo Sanchez**

Universidade Estadual Paulista – Departamento de Mecânica da FEB/UNESP- Av Luiz Edmundo Carrijo Coube s/n - CEP 17033-360-Bauru - SP Fone (14) 221 6119- Bauru.  
e-mail: [sanchez@feb.unesp.br](mailto:sanchez@feb.unesp.br)

**Geraldo Luiz Palma**

Universidade Estadual Paulista Departamento de Mecânica da FEB/UNESP- Av Luiz Edmundo Carrijo Coube s/n - CEP 17033-360-Bauru - SP Fone (14) 221 6119- Bauru.  
e-mail: [glpalma@feb.unesp.br](mailto:glpalma@feb.unesp.br)

**Augusto Ronchi Junior**

Universidade Estadual Paulista Departamento de Mecânica da FEB/UNESP- Av Luiz Edmundo Carrijo Coube s/n - CEP 17033-360-Bauru - SP Fone (14) 221 6119- Bauru.  
e-mail: [ronchi@feb.unesp.br](mailto:ronchi@feb.unesp.br)

***Resumo.** O grau de uniformidade na homogeneização de partículas sólidas tornou-se muito importante em razão das crescentes exigências do mercado, principalmente na área mecânica como no caso de sinterização e dos elementos básicos em soldagem. No agro-indústria utiliza-se na homogeneização de ração e de fertilizantes. O grau de uniformidade é mais exigido devido à necessidade efetiva no cumprimento de padrões internacionais de qualidade em função da globalização dos mercados. A homogeneidade da mistura de partículas sólidas depende do tipo de misturador, granulometria, densidade, umidade e cargas eletrostáticas. Em particular, no misturador de corpo fixo, a mistura depende também da maneira com que as pás atuam nos materiais, sendo as principais causas: a forma, o posicionamento das pás, a área das pás e a rotação. O objetivo deste trabalho foi determinar o tempo e a rotação que apresentam maior eficiência de mistura. Foi utilizado um misturador de corpo fixo e anexado no rotor um jogo de 6 pás retas com as pontas curvas arredondadas. As taxas de enchimento do misturador foram de 40, 50 e 60%. O material empregado foi o cloreto de sódio com 0,3 mm de diâmetro representando 10% do valor da taxa de enchimento e arenito com diâmetro de 0,6 mm representando 90% da taxa de enchimento do misturador. Os principais resultados comprovam que a 430 rpm e taxa de enchimento de 40%, o melhor tempo foi de 30 s e com 570 rpm, taxa de enchimento de 60%, o aumento do tempo não produziu significativa melhora.*

***Palavras-chave:** homogeneização de pós, misturadores de grãos e misturador de corpo fixo.*

## 1. INTRODUÇÃO

Uma mistura é perfeita quando o resultado de um estudo estatístico das amostras indica que estas estão na mesma proporção em que foram colocadas no misturador. É também aquela que não permite distinguir ordem no arranjo das partículas em uma amostra. Na homogeneização com materiais de granulometrias diferentes é necessário ter muito cuidado na retirada das amostras. A simples introdução da sonda captadoras de amostras pode alterar o resultado do grau de mistura, mesmo com o uso de um misturador eficiente.

No processo de homogeneização de sólidos granulados são empregados muitos tipos de misturadores, sendo a escolha uma função do tipo de material a ser homogeneizado, granulometria, densidade e umidade. Os misturadores podem ser os de corpo móvel e de corpo fixo, sendo os mais utilizados os de corpo móvel, pois funcionam com baixa rotação e exigem baixa potência. No entanto, para se obter uma boa mistura, via de regra é necessário mais tempo.

Os elementos a serem misturados são colocados em porcentagens desejadas no interior do misturador e quando o corpo do misturador gira os componentes da mistura vão se homogeneizando através de processos de queda livre e escorregamento. Eles são divididos nos seguintes tipos: duplo cone, em V, em Y, em forma de cubo, cilíndrico horizontal e angular. Para cada batelada composta de vários elementos a serem homogeneizados utiliza-se um tipo de misturador de corpo móvel. No misturador de corpo fixo obtém-se boa mistura em tempo reduzido, entretanto exige-se alta rotação e conseqüentemente mais potência.

Estes misturadores são constituídos por um cilindro horizontal estático e um rotor girante que pode ser de pás ou tiras helicoidais, os quais movimentam as partículas. Dependendo das características da mistura aplica-se no interior do misturador uma porcentagem que é chamada de taxa de enchimento. O fator preponderante no sucesso de uma homogeneização é o espaço livre que é a diferença entre o volume útil do misturador e a taxa de enchimento.

Existem vários fatores que influem na execução de uma mistura de sólidos. Os mais relevantes são: distribuição de tamanho das partículas, densidade e características de sua superfície. As propriedades dos ingredientes predominam nas operações de todos os tipos de misturadores e as características mais comuns observadas em sólidos são as seguintes:

- a) Densidade: é o peso por unidade de volume de uma quantidade de partículas sólidas, usualmente expressa em  $\text{kg/m}^3$
- b) Formato: podem ser granulados ovais, blocos, esferas, flocos, cavacos, barras, filamentos, cristais ou formas irregulares.
- c) Características de superfície: inclui superfície da área e tendências a reter cargas eletrostáticas
- d) Habilidade friável: esta é uma tendência do material em quebrar em pedaços menores no decorrer da operação. Existem testes quantitativos especialmente desenvolvidos para certos materiais como carvão e podem ser usados para estimar suas propriedades
- e) Estado de aglomeração: refere-se ao estado das partículas movendo-se independentes ou aderidas com as outras em blocos. Este tipo de aglomeração e o grau de energia empregada durante a mistura afetarão a extensão da quebra do aglomerado e dispersão de partículas
- f) Umidade ou líquido no conteúdo de sólidos: freqüentemente uma pequena quantidade de líquido é adicionado para diminuir a poeira ou exigências especiais. O material resultante pode ter tanto a aparência de um sólido seco quanto de uma pasta
- g) Limitadores de temperatura dos ingredientes: são alguns efeitos não usuais quando há mudança de temperatura podendo ocorrer alguma alteração ou reação. Só se obtém os resultados sobre uma mistura de partículas sólidas através de ensaios e avaliação das amostras.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Wang & Fan (1977), afirmam que o estado final da mistura pode ser analisado como equilíbrio dinâmico. É um processo reversível entre a segregação e a homogeneidade, dependendo da qualidade da mistura. Define-se que a segregação é o processo que produz separação das partículas

em porcentagem correspondente. É uma mistura perfeita, quando uma amostra é constituída de partículas de diferentes características.

Em Danckwerts (1953), o autor cita que a importância da operação de mistura na eficiência de um processo químico é diferente de um processo mecânico. Destacou a necessidade de estabelecer dois parâmetros distintos para obter-se uma mistura perfeita: segregação e grau de intensidade. A segregação descreve o estado de subdivisões em grupos e o grau de intensidade na segregação expressa as diferenças de composições dentro da mistura. Esses dois parâmetros indicam que a mistura é tanto melhor quanto menores forem seus valores da escala do desvio. O grau de mistura pode ser obtido verificando a menor variação entre os elementos, comparando com as taxas de enchimento em várias condições.

Quaglia (1992), cita que uma mistura uniforme ocorre depois de um determinado tempo de funcionamento do misturador. Brumberg & Mariz (1953), foram os primeiros pesquisadores que trabalharam com mistura e apresentaram as definições baseadas em conceitos estatísticos teóricos citando que a estimativa de homogeneidade é muito complexa.

Carley et al (1964) citam que a técnica para avaliação do tempo de operação passa a apresentar um novo processo, que é a separação dos componentes. Losnak, (1996), constatou que ao misturar pós com mesma granulometria em misturador de corpo fixo, a pá menor apresentou menor consumo de potência, mas não tão eficiente para homogeneização quanto as pá de áreas maiores. Losnak (1997), pesquisou a influencia da rotação nos misturadores de corpo fixo e constatou que a rotação que apresentou melhor resultado foi a de 355 rpm, utilizando-se pás com áreas maiores e taxa de enchimento de 40% da capacidade útil do misturador.

Losnak (1999), utilizando um misturador de corpo fixo o tempo de mistura que apresentasse menor desvio da mistura ideal, homogeneizou grânulos nitrogenados (N) com diâmetros entre 2 e 4 mm e densidade aparente de 829 kg/m<sup>3</sup>, grânulos fosfáticos (P) com diâmetros entre 2,36 e 4,75 mm, com densidade aparente de 1.179 kg/m<sup>3</sup>, e grânulos de potássio (K) entre 0,35 e 1,4 mm e densidade 1.263kg/m<sup>3</sup>. Concluiu que o melhor tempo de homogeneização foi de 30 s. Em seguida passou a segregar e depois aos 90 s passou a apresentar resultados satisfatórios. Confirmou ainda que isto é uma característica cíclica durante o processo de homogeneização.

Losnak et al (2001) comparou um misturador de corpo fixo real e um misturador em escala reduzida na proporção de 1:2,57. Foram utilizadas 4 rotações no rotor de cada misturador e para cada rotação retirou-se amostras em intervalos de 15 em 15 s até o máximo de 120 s. As taxas de enchimentos foram de 40, 50 e 60 % do volume útil dos misturadores. Foram utilizados para a homogeneização o cloreto de sódio e arenito com granulometrias de 0,30 mm de diâmetro. O misturador real com taxa de enchimento de 40 % e rotação de 183 rpm apresentou a melhor homogeneização aos 120 s com desvio da mistura ideal de 0,02 % e desvio médio de 0,42 %. Extrapolando para o protótipo, a rotação passou para 295 rpm.

Inicialmente não houve bons resultados e só aos 90 segundos houve a melhor homogeneização com um desvio de 0,90 % mas voltou a apresentar segregação. A média da mistura ideal foi de 2,48 % e com essa rotação a extrapolação não apresentou resultado satisfatório. Com a mesma taxa de enchimento anterior e a rotação de 270 rpm, o misturador real apresentou a melhor homogeneização aos 75 s com desvio da mistura ideal de 0,32 % e desvio médio de 0,50 %. O protótipo teve sua rotação extrapolada para 433 rpm, apresentando a melhor homogeneização aos 15 s com um desvio médio de 0,36 %. Mantendo a mesma taxa de enchimento de 40 % e aumentando a rotação do misturador real para 355 rpm, este apresentou a melhor homogeneização aos 120 s e o desvio da mistura ideal foi 0,16 % com desvio médio foi de 0,10 %. Extrapolando para o protótipo, a rotação de 568 rpm apresentou a melhor homogeneização também aos 120 s e o desvio da mistura ideal foi de 0,04 % com desvio médio de 0,20 %. As rotações do misturador real e do protótipo foram satisfatórias, pois a diferença entre os dois misturadores foi de 0,12 %.

Com rotação de 441 rpm, o misturador real apresentou melhor a homogeneização aos 45 s com desvio da mistura ideal de 0,13 % e desvio médio de 0,26 %. O protótipo passou para 706 rpm e apresentou a melhor homogeneização aos 60 segundos com um desvio de 0,03% e desvio médio de 0,61 %. Aumentando a taxa de enchimento para 50% e o misturador real com 183 rpm, obteve-se a

melhor homogeneização aos 30 s. O desvio da mistura ideal foi 0,11 % e o desvio médio foi de 0,49 %. Extrapolando essa rotação para o protótipo, a rotação foi para 295 rpm e apresentou a melhor homogeneização aos 45 s com desvio da mistura ideal em 0,03 % e desvio médio da mistura ideal de 0,73 %.

Com a mesma taxa de enchimento anterior e rotação de 270 rpm, o misturador real apresentou a melhor homogeneização aos 105 s com desvio da mistura ideal de 0,43 % e desvio médio de 0,50 %. O protótipo passou para 433 rpm e apresentou a melhor homogeneização aos 75 s com um desvio de 0,48 % da mistura ideal e desvio médio de 0,93 %. O misturador real com taxa de enchimento de 50 % e rotação de 355 rpm apresentou a melhor homogeneização aos 105 s com desvio da mistura ideal de 0,04 % e desvio médio de 0,65 %. Extrapolando para o protótipo a rotação passou para 568 rpm e apresentou a melhor homogeneização também aos 120 s com um desvio da mistura ideal de 0,04 % e desvio médio de 0,20 %.

Com a mesma taxa de enchimento anterior e rotação de 441 rpm, o misturador real apresentou a melhor homogeneização aos 15 s com desvio de 0,04 % e desvio médio de 0,35 % da mistura ideal. O protótipo passou para 706 rpm e apresentou a melhor homogeneização aos 60 s com um desvio de 0,16 % e desvio médio de 1,64 %. O misturador real com taxa de enchimento de 60 % e rotação de 183 rpm teve sua melhor homogeneização aos 105 s com desvio da mistura ideal em 0,87 % e desvio médio de 1,04%. Extrapolando para o protótipo, a rotação passou para 295 rpm e apresentou a melhor homogeneização aos 15 s com um desvio da mistura ideal de 0,45 % e desvio médio de 1,07 %. Com a mesma taxa de enchimento anterior e rotação de 270 rpm, o misturador real apresentou a melhor homogeneização aos 105 s com desvio de 0,04 % e desvio médio de 0,84 % da mistura ideal.

O protótipo passou para 433 rpm e apresentou a melhor homogeneização aos 90 s com um desvio da mistura ideal de 0,06% e desvio médio de 0,07 %. O misturador real com taxa de enchimento de 60 % e rotação de 355 rpm apresentou a melhor homogeneização aos 120 s com desvio da mistura ideal de 0,89 % e desvio médio de 0,17 %. Extrapolando para o protótipo, a rotação passou para 568 rpm e apresentou a melhor homogeneização também aos 30 s com um desvio da mistura ideal de 0,02 % e desvio médio de 0,02 %.

Com a mesma taxa de enchimento anterior e rotação de 441 rpm, o misturador real apresentou a melhor homogeneização aos 60 s com desvio da mistura ideal de 0,17 % e desvio médio de 0,33 % da mistura ideal. O protótipo passou para 706 rpm e apresentou a melhor homogeneização aos 105 s com um desvio da mistura ideal de 0,36 % e desvio médio de 0,62%. Os resultados obtidos com a taxa de enchimento de 40 % e rotação de 183 rpm e feita a extrapolação, a rotação não apresentou resultado satisfatório. O misturador real apresentou bom desempenho com diferença da mistura ideal de 0,02 %, mas com tempo maior. Na extrapolação, o protótipo com 295 rpm apresentou o melhor resultado de homogeneização com o tempo de 90 s. Com as rotações de 270 rpm do misturador real e do protótipo 433 rpm, os resultados foram satisfatórios pois, a diferença entre os dois misturadores foi de 0,12 %.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O misturador utilizado foi o utilizado por Losnak (1999), como mostra o diagrama da Fig.(1), com os níveis de taxa de enchimento *a* (40%), *b* (50%) e *c* (60%). Foram usados ainda, nos ensaios: tacômetro eletrônico digital, temporizador eletro-mecânico, peneiras, vibrador para peneiras, balança eletrônica, estufa, captador de amostra; bandejas, funis, béquer, pisseta e filtro de papel. Os materiais a serem homogeneizados foram cloreto de sódio e arenito.

Através de um conversor de frequência alterava-se a rotação do motor elétrico e uma correia transmitia a rotação ao misturador. As rotações utilizadas foram de 430 e 570 rpm.

O material para a pesquisa foi cloreto de sódio e arenito, materiais esses que são de baixo custo e apresentam densidades bem próximas. Após terem passado pelo controle granulométrico apresentado pelo método Losnak (1998), foram variadas as rotações e utilizadas taxas de enchimen-

to de 40, 50 e 60% da capacidade útil do misturador. Cada taxa de enchimento era composta de 10% de cloreto de sódio e 90 % de arenito.

As amostras foram retiradas aos 30, 60, 90, 120,150 e 180 s de operação e cada ensaio foi repetido 3 vezes calculando-se a média e os desvios dos resultados. O desempenho de cada jogo de pás foi avaliado através dos gráficos traçados e através das proporções percentuais em função do tempo e da rotação. A mistura ideal é aquela que em cada amostra contem 90 % de um elemento e 10 % do outro elemento. A análise da mistura e as equações foram às utilizadas por Losnak (1995).

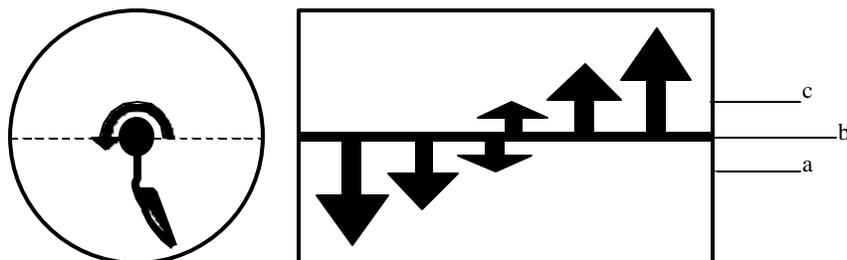


Figura 1. Esquema do misturador.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com taxa de enchimento de 40 % e rotação de 430 rpm, a Fig. (2) mostra que aos 30 segundos houve a melhor homogeneização com desvio de 0,95 % da diferença da mistura ideal. Com intervalos de 30 em 30 segundos o desvio médio foi 1,62 %. A linearização evidencia que o granulado de 0,30 mm apresenta a tendência de aumentar o tempo de operação e apresenta a melhor homogeneidade.

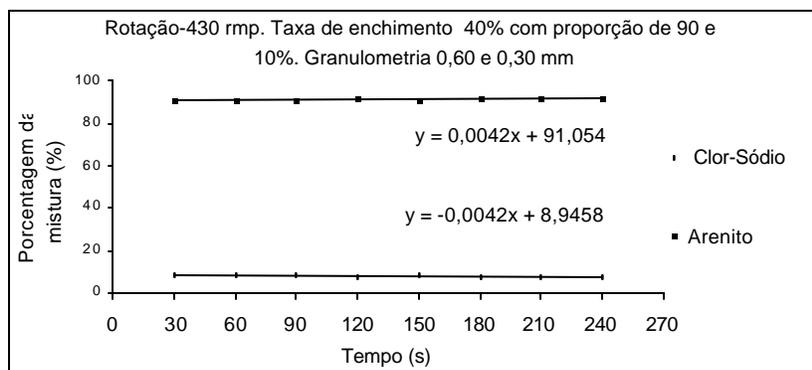


Figura 2. Porcentagem de mistura em função do tempo de mistura.

Com taxa de enchimento de 50 %, a homogeneização com menor desvio da mistura ideal foi aos 210 s com 0,49 %, o que pode ser visto na Fig.(3). Com essa rotação e taxa, a média do desvio é de 0,78 %.

A linha de linearização mostra que aumentando o tempo de operação não há melhora da qualidade da mistura. Com a taxa de enchimento de 60 % o desvio médio em todo o ensaio foi de 1,40 % o que pode ser considerado como não satisfatório. A melhor homogeneização ocorreu aos 210 s com desvio da mistura ideal em 0,81 %. Pelas retas de linearização pode -se constatar que tomando por base dos 30 aos 240 segundos e mesmo aumentando o tempo de homogeneização não há melhora da qualidade da mistura, como mostra a Fig. (4).

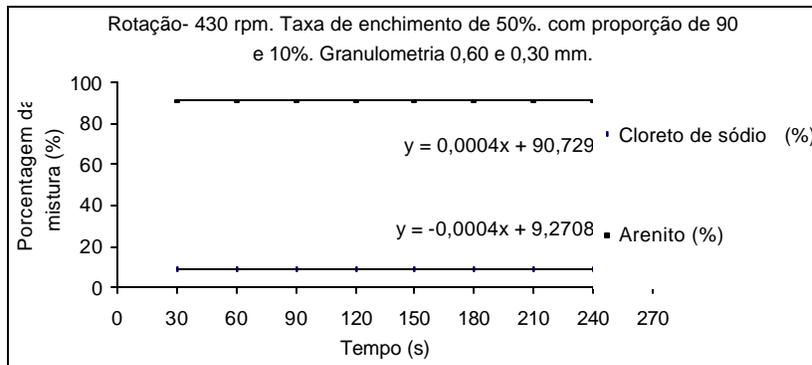


Figura 3. Porcentagem de mistura em função do tempo de mistura.

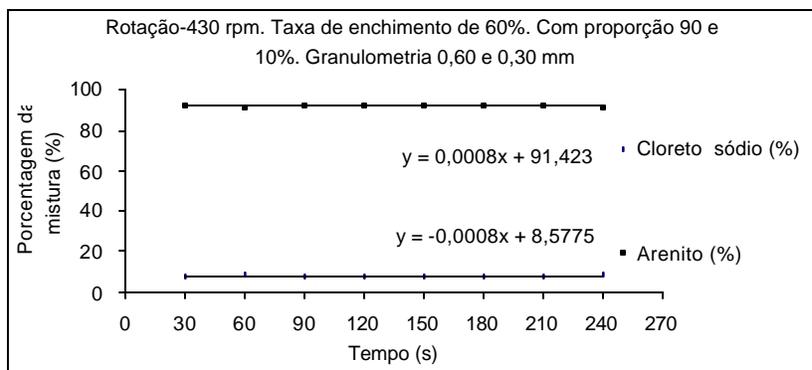


Figura 4. Porcentagem de mistura em função do tempo de mistura.

Aumentando a rotação para 570 rpm, com taxa de enchimento de 40 % o menor desvio da mistura ideal foi apresentado aos 120 segundos em 0,91%. A Figura (5) apresenta as retas de linearização paralelas, o que indica que mesmo aumentando o tempo de operação para essa taxa de enchimento não há diminuição do valor do desvio da mistura ideal. Com a taxa de enchimento de 50%. e rotação de 570 rpm, comparando com a taxa de enchimento de 40%, o desvio da mistura ideal foi de 1,85% e pelo que mostra a Fig.(6), a tendência não é de melhora da homogeneização

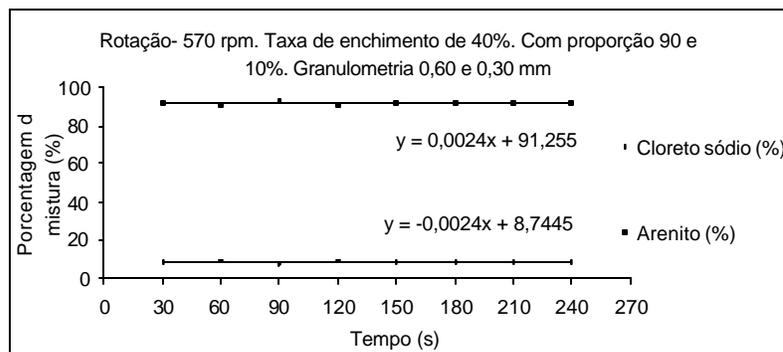


Figura 5. Porcentagem de mistura em função do tempo de mistura.

Com a taxa de 60%, a diferença do desvio médio até 240 s foi de 1,40%. A melhor homogeneização foi aos 210 s, com a diferença do desvio médio de 0,81%. Como se vê na Fig.(7), através da reta de linearização, mesmo aumentando o tempo de operação, a diferença da mistura ideal vai se manter. Então concluímos que em apenas 30 segundos obteremos a homogeneização com desvio inferior a 1,5%.

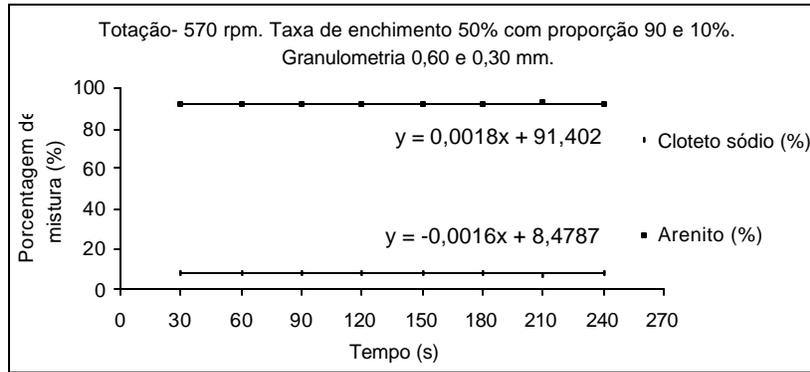


Figura 6. Porcentagem de mistura em função do tempo de mistura.

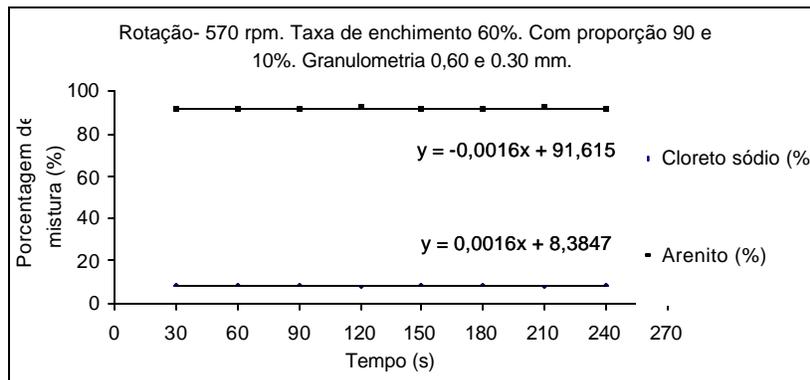


Figura 7. Porcentagem de mistura em função do tempo de mistura.

Com a taxa de 60%, a diferença do desvio médio até 240 s foi de 1,40%. A melhor homogeneização foi aos 210 s, com a diferença do desvio médio de 0,81%. Como se vê na Fig. (7), através da reta de linearização, mesmo aumentando o tempo de operação, a diferença da mistura ideal vai se manter. Então concluímos que em apenas 30 s obteremos a homogeneização com desvio inferior a 1,5%.

## 5. CONCLUSÕES

Com a rotação de 430 rpm e taxa de enchimento de 40%, o resultado mais eficiente em homogeneização foi aos 30 s. Se for aumentado o tempo operacional de homogeneização há tendência de reduzir ainda mais o desvio. Já com a mesma rotação e taxas de enchimento de 50% e de 60%, além de não apresentar bons resultados, como o aumento do tempo à tendência e de aumento da segregação.

Com rotação de 570 rpm e com as taxas de enchimento de 40 e 50%, não houve resultado satisfatório e se for aumentado o tempo de homogeneização, haverá aumento do desvio. Já com taxa de enchimento de 60%, apesar dos resultados não serem bons, há indiferença em operar com 30 ou 240 s, pois o resultado será o mesmo.

## 6. REFERÊNCIAS

- Blumber, G, and Maritz, J. S., 1953, Mixing of solid particles. Chemical Engineering Science. v.2, p. 240-246.
- Carley, K.W. and Donald, M.B., 1964, The mixing of solids in tumbling mixers- II. Chemical Engineering Science. v.19. p 191-199.
- Danckwerts, P. V., 1953, Theory of mixtures and mixing. Research: Science and its application in industry. V.6, n.9, p.355-361, September.
- Quaglia, G., 1992, Sienza e Tecnologia de Alimentos. Milão: Chiciotti Editori., P. 328-330.
- Losnak, C. ,1996, Avaliação da potência consumida em misturador de corpo fixo. XXV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola e II Congresso Latino-americano de Engenharia Agrícola. Inserida no CD-ROM, sob nº MAG 034 dos ANAIS do XXV CONBEA -Bauru/SP.
- Losnak, C., 1997, Influência da rotação na mistura de grão em misturador de corpo fixo. XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Inserida no CD-ROM, sob nº MAG 035 dos ANAIS do XXVI CONBEA Campina Grande/PB.
- Losnak, C. and Sanchez, L.E.A., 1998, Avaliação de um agitador de peneiras para controle granulométrico. In Anais. Poços de Caldas: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, pp. 31-33.
- Wang, R.H. and Fan, L.T., 1977, Stochastic modelling of segregation in a motionless mixer. Chemical Engineering Science, v. 32,p p. 695–701.
- Losnak, C.; Santos Filho, A. Santos J.E.G., 1999, Avaliação da Mistura de Granulados de Formas Irregulares. XXVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - Tendências e Inovações. Pelotas/RS. Inserido no CD-ROM da SOCIEDADE BRASILEIRA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, nº MMA-093 dos ANAIS do XXV CONBEA.
- Losnak, C.; Ronchi, A.J.; Palma, G.L. and Sanchez, L.E.A., 2001, Comparação de um misturador de pós em escala normal e outro em escala reduzida. V Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica e IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Mérida/Chile-V, CIDIM, IV CONIM. Inserida no CD-ROM - Procesos de Fabricación, pp. 979-984.

### OPTIMIZATION OF ROTATION AND TIME IN THE HOMOGENEIZATION OF GRANULES WITH DIFFERENT DIAMETERS

**Abstract.** *The particles homogenization had become important in some areas of mechanical industries such powder metallurgy and welding. In the agricultural industry the homogenization is used to mix fertilizer and the others. Today the quality is fundamental in the world globalized that need international standardization. The mix homogenization depends of mixer, size of grain, density, humidity and electrical conditions. But the principal conditions are relative to mixer fixed body such: propeller shape and its position, propeller area and rotation. This goal of this work is valuing the better time and rotation to higher performance. It was used for this a mixer fixed body with a group of 6 rounded point shovels. The wadding rate was 40, 50 e 60%. The material used was the sodium chloride with 0,3 mm of size grain relative to 10% of wadding rate and sandstone with 0,6 mm of size grain relative to 90% of wadding rate. The results showed that: the best time was 30s under 430 rpm and wadding rate 40%; the same experiment under 570 rpm and wadding rate 60% not produced the expected result.*

**Keywords :** *powder homogenization , grain mixer , mixer fixed body.*