

## PROJETO DE UM GRANULADOR DE DISCO ROTATIVO EM ESCALA LABORATORIAL

A. H. R. REZENDE<sup>1</sup>, D. D. L. DA COSTA<sup>1</sup>, F. A. OLIVEIRA<sup>1\*</sup>, F. P. TOFANELLO<sup>1</sup>, L. M. RODRIGUES<sup>1</sup>, S. F. MORAES JÚNIOR<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Departamento de Engenharia Química  
\*e-mail: fernandoamaralo@yahoo.com.br

### RESUMO

O processo de granulação é uma operação unitária de ampla aplicação na indústria de fertilizantes. O fertilizante granulado apresenta melhorias quanto ao seu aspecto físico, facilidade de aplicação na agricultura, eliminação de poeiras fugitivas nas unidades de produção e ensaque. O fosfogesso é um resíduo proveniente da produção de fertilizantes fosfatados, sendo que a cada tonelada produzida de fertilizantes fosfatados, cerca de 4 toneladas de fosfogesso são obtidas, gerando problemas no armazenamento e riscos ao meio ambiente. Tais problemas podem ser minimizados granulando-se o fosfogesso residual utilizando-o majoritariamente na agricultura. O presente trabalho visa a construção de um granulador de disco rotatório em escala laboratorial que com a combinação pré-estabelecida de reagentes irá promover a granulação do resíduo da produção de fertilizantes. Para a construção do equipamento foi realizado um embasamento teórico a fim de estabelecer as principais variáveis que influenciam na técnica de granulação, bem como as dimensões requeridas para a construção do granulador.

### 1 INTRODUÇÃO

Dados recentes divulgados pela ONU mostraram que no ano de 2013 a população mundial atingiu 7,2 bilhões de pessoas no mundo, sendo que hoje 54% dessas vivem em áreas urbanas (ONU, 2013). De acordo com as previsões da organização, no ano de 2025 pode-se chegar a 8,1 bilhões de pessoas e 9,6 bilhões em 2050. Assim surgem preocupações com relação à migração em massa, acesso à água potável e principalmente a disponibilidade de alimentos. Esses fatores são cruciais para o crescimento da população e a demanda cada dia mais alimentos em menores porções de terra (ONU, 2014).

Essa demanda pode ser maximizada pelo uso de fertilizantes disponíveis hoje no mercado mundial. Os mesmos ajudam no

crescimento e disponibilidade de insumos as plantas para seu melhor e mais rápido desempenho no campo. Hoje, os fertilizantes são responsáveis por aproximadamente 60% da produção atual de alimentos. O Brasil ainda está distante da autossuficiência em fertilizantes, segundo Mario Alves Barbosa Neto, diretor-presidente da Vale Fertilizantes. Porém no ano de 2011 o cenário foi bem favorável mostrando um crescimento de 30% em relação ao ano anterior (ARAÚJO, 2010).

Uma das operações fundamentais dentro do acabamento na produção dos fertilizantes é a granulação, gerando produtos de boa qualidade e ricos em macronutrientes. Além disso, existem fatores que influenciam diretamente na qualidade do produto, tais como, dureza, porosidade, morfologia e

tamanho dos grânulos e o ligante a ser utilizado (COUTO, 2000).

Dentro da granulação, tem-se a via úmida que se utiliza de equipamentos como granulador de tambor rotatório e granulador de disco rotatório. Nesses dispositivos, as partículas são submetidas a choques físicos promovidos pelo cascadeamento e interação química pela aspersão do ligante. Além disso, estes equipamentos têm ampla aplicação no ramo de fertilizantes que é um ponto forte da indústria química regional. Portanto, o desenvolvimento e a construção do granulador podem auxiliar na descoberta de novas aplicações em diferentes materiais granulados (GONÇALVEZ, 2011).

Por ser uma área de estudo muito ampla e não totalmente conhecida, o desenvolvimento ao longo dos anos do processo e do projeto dos equipamentos de granulação ainda não permitem um conhecimento claro deste fenômeno. O processo ainda é influenciado por diversas variáveis, podendo-se salientar: teor de umidade, velocidade de rotação do tambor, a distribuição do tamanho inicial das partículas, o tempo de residência, a relação sólido/ligante (BERNARDES, 2006).

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo a construção de um granulador de disco rotativo em escala laboratorial, bem como obter o seu modelo empírico por meio de correlações apropriadas.

Como objetivos específicos, foram obtidos os melhores parâmetros físicos e químicos utilizados no funcionamento do granulador e também fora realizado um estudo para verificar a variável de maior influência no processo em questão.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Construção

A metodologia empregada na construção do granulador de disco rotatório

foi subdividida em 3 partes. Primeiramente foi adquirido o prato do granulador, confeccionado em ferro fundido com diâmetro de 60 cm de diâmetro, 6 cm de altura e 4 mm de espessura, pesando aproximadamente 15 kg. Posteriormente foi feita a base do equipamento visando-se a estabilidade do mesmo em função do peso do prato, suporte para as demais peças e posição confortável do operador. Assim a base teve dimensões de 74 cm de comprimento, 45 de largura e 92 cm de altura. Além disso a base foi feita permitindo o movimento de angulação do prato, tornando assim possível qualquer ângulo de trabalho no intervalo de 0 a 90°. Por fim, foi adquirido um motor de esteira com características técnicas de 775 watts, 90 volts e rotação máxima de 4300 rpm. Uma ligação entre o motor e prato também foi feita, acoplando-se um redutor de velocidade controlado rotacionalmente, permitindo trabalhar dentro da faixa desejada do processo de granulação. As figuras 1 e 2 mostram em duas vistas o granulador de disco rotativo.

**Figura 1:** Vista frontal do granulador.



Fonte: Autor (2015).

**Figura 2:** Vista lateral do granulador.



Fonte: Autor (2015).

## 2.2 Procedimento Experimental

A solução ligante utilizada no processo de granulação foi a fécula de mandioca juntamente com uma solução de hidróxido de sódio de concentração  $0,134 \text{ molL}^{-1}$ . A fim de testar as influências da concentração do aglomerante e do ângulo de inclinação do prato no processo, foram utilizadas diferentes quantidades de fécula de mandioca e diferentes ângulos, mostrados na tabela 1. Para cada formulação testada, a quantidade de gesso utilizada será a mesma de 250g.

**Tabela 1:** Diferentes formulações da solução ligante e ângulos do prato.

Teste	Inclinação do prato	Composição
1	45°	24,5g fécula/ 250g fosfogesso
2	55°	24,5g fécula/ 250g fosfogesso
3	65°	24,5g fécula/ 250g fosfogesso
4	45°	35,0g fécula/ 250g fosfogesso
5	55°	35,0g fécula/ 250g fosfogesso
6	65°	35,0g fécula/ 250g fosfogesso
7	45°	45,5g fécula/ 250g fosfogesso

8	55°	45,5g fécula/ 250g fosfogesso
9	65°	45,5g fécula/ 250g fosfogesso

Fonte: Autor (2015).

O procedimento de granulação é simples e começa na pesagem dos reagentes. Com os reagentes pesados, misturava-se a fécula de mandioca no fosfogesso e regulava-se a inclinação do prato do granulador com a ajuda do aplicativo para smartphone *Clinometer*. Em seguida, a mistura de fosfogesso e fécula de mandioca era transferida para o granulador. O próximo passo era ligar o equipamento e ajustar a uma velocidade que visivelmente era feito o cascadeamento. Após testes preliminares, foi definido uma velocidade de rotação na posição 3, equivalente a, aproximadamente, 22 RPM. Com o prato em movimento, começava-se a aspergir a solução de NaOH na mistura, utilizando uma espátula como raspador. Este teve a finalidade de impedir que o material se aglomerasse nas paredes do prato prejudicando o cascadeamento.

Após borrifar todo o volume da solução de NaOH, desligava-se o granulador e esperava-se cerca de 15 min para retirar os grãos de fertilizantes do prato. Este tempo era necessário para os grãos secassem ligeiramente e com auxílio de uma espátula retirava-se o material granulado do prato.

Em seguida, o material granulado era levado para a estufa a uma temperatura de 72 °C. Por último, os grânulos já secos eram submetidos à análise granulométrica. Esta etapa era realizada utilizando as peneiras de 2 mm e 5,6 mm. As peneiras eram montadas em ordem decrescente e, por último, o fundo do sistema. As massas de partículas que ficavam retidas em cada peneira e no fundo eram pesadas e serão mostradas nos resultados deste trabalho.

Vale ressaltar que todas as formulações foram testadas em duplicata, isto é, ao total foram realizados 18 testes.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da relação das formulações mostradas anteriormente na tabela 1, os experimentos foram realizados em duplicata a fim de diminuir os erros experimentais. As faixas granulométricas amostradas foram de grânulos menores que 2 mm, entre 2 e 5,6 mm e acima de 5,6mm, lembrando que a faixa de interesse e consequentemente a utilizada no planejamento fatorial foi entre 2 e 5,6 mm. Os dados obtidos de granulometria tanto em massa quanto em porcentagem para todas as faixas analisadas se encontram na tabela 2, em que:

I = Inclinação do prato;

R = Relação massa de ligante/massa de fosfogesso;

FG = Faixa Granulométrica da amostra em milímetros;

MM = Média mássica da duplicata;

M (%) = Média percentual da duplicata.

**Tabela 2:** Resultados experimentais.

I	R	FG	MM	M (%)
45°	0,098	x<2	23,09	7,83
		2<x<5,6	195,14	66,12
		x>5,6	76,72	26,05
55°	0,098	x<2	60,65	21,73
		2<x<5,6	118,49	42,37
		x>5,6	100,61	35,90
65°	0,098	x<2	88,73	33,34
		2<x<5,6	137,37	51,17
		x>5,6	41,20	15,49
45°	0,128	x<2	36,42	11,68
		2<x<5,6	222,79	71,31
		x>5,6	52,6	17,01
55°	0,128	x<2	68,86	22,08
		2<x<5,6	206,60	66,40
		x>5,6	35,83	11,52

65°	0,128	x<2	52,66	17,60
		2<x<5,6	134,39	47,03
		x>5,6	93,84	35,38
45°	0,182	x<2	81,81	31,18
		2<x<5,6	158,67	58,99
		x>5,6	23,32	9,84
55°	0,182	x<2	44,07	15,98
		2<x<5,6	183,34	66,57
		x>5,6	48,02	17,45
65°	0,182	x<2	40,51	13,48
		2<x<5,6	159,11	52,79
		x>5,6	97,12	33,77

Fonte: Autor (2015).

Para analisar os valores obtidos para a granulometria foi realizado um planejamento fatorial 3<sup>2</sup> onde os dois fatores são: Inclinação e Relação massa de ligantes/ massa de fosfogesso, totalizando 9 experimentos. Vale ressaltar que foram realizados testes em duplicata, portanto o valor utilizado no planejamento foi uma média dos valores obtidos nos dois experimentos. A resposta obtida foi uma porcentagem granulométrica na faixa de 2 a 5,6 mm. A tabela 3 relata os níveis utilizados para cada fator.

**Tabela 3:** Fatores e níveis utilizados no planejamento fatorial.

Fatores	Níveis	Níveis Estatística
Inclinação	45°	-1
	55°	0
	65°	1
Relação [ $\frac{\text{Massa de ligante}}{\text{Massa de fosfogesso}}$ ]	0,098	-1
	0,128	0
	0,182	1

Fonte: Autor (2015).

Como pode ser observado na tabela 3, os níveis foram codificados em -1, 0, 1 a fim de que os dois fatores tivessem a mesma padronização, não sofrendo influência dos valores adotados.

Após a codificação dos níveis, a tabela 4 relata como foram lançados os valores obtidos no software.

**Tabela 4:** Valores utilizados para a realização do planejamento fatorial.

Inclinação	Relação	% ( $2 < x < 5,6\text{mm}$ )
	$\frac{\text{M.de lig.}}{\text{M.de fosf.}}$	
-1	-1	66,120
0	-1	31,620
1	-1	51,165
-1	0	71,310
0	0	66,400
1	0	39,420
-1	1	66,390
0	1	72,660
1	1	68,790

Fonte: Autor (2015).

Através do planejamento fatorial pode-se observar as interações dos dois fatores analisados de forma linear, quadrática e as interações da multiplicação dos dois fatores de forma linear e quadrática, dessa forma é possível encontrar um modelo que relaciona todas as interações, ou somente o modelo que relacionam as interações que obtiveram menores erros e que foram significativas para o intervalo de confiança adotado (92%). Para a realização do modelo a tabela 4 se faz importante, pois nela é possível avaliar os coeficientes das interações bem como o erro obtido, o nível de significância (p), e o coeficiente de correlação quadrática.

É de extrema importância salientar que após analisado todas as interações deve-se retirar as que não apresentam significância e também fazer análises das interações que obtiveram p próximos do valor arbitrado (0,08), observando sempre o coeficiente de correlação quadrática que deve ser o mais próximo da unidade, para que o modelo proposto tenha maior confiança. A tabela 5

apresenta os dados obtidos após o planejamento ser realizado:

**Tabela 5:** Resultados obtidos através do planejamento fatorial.

Int.	Efeitos	Coef.	Erro	P (0,08)
TC	59,319	59,319	0,195	0,002
I (L)	-14,815	-7,407	0,478	0,020
I (Q)	-3,639	-1,820	0,414	0,072
R (L)	19,645	9,822	0,478	0,016
I (L) x R (L)	8,677	4,339	0,586	0,043
I (L) x R (Q)	-12,806	-6,403	0,507	0,025
I (Q) x R (L)	16,046	8,023	0,507	0,020
I (Q) x R (Q)	11,005	5,503	0,439	0,025

Fonte: Autor (2015).

Segue abaixo a legenda da primeira coluna da tabela 5:

TC = Termo constante;

I (L) = Inclinação linear;

I (Q) = Inclinação quadrática;

R (L) = Relação (m/m) linear;

R (Q) = Relação (m/m) quadrática.

A partir da tabela 5, pode-se observar que a interação entre o fator Relação mássica da forma quadrática foi retirada já que com a sua presença algumas variáveis que apresentam valores de coeficientes altos se tornavam insatisfatórias, e, além disso, o coeficiente de correlação quadrática foi de 0,560. Pode-se observar que os valores de p não estão próximos de 0,08, o que quer dizer que as interações são aceitáveis. O coeficiente de correlação quadrática ( $R^2$ ) encontrado foi

de 0,9998 e o somatório dos erros residual foi de 0,3430. O valor de  $R^2$  foi alto o que mostra que o modelo obtido através dos dados experimentais foi confiável. Portanto o modelo obtido para o planejamento realizado é mostrado através da **equação 1**:

$$G = 59,319 - 7,407.I - 1,819.I^2 + 9,822.R + 4,338.I.R - 6,403.I.R^2 + 8,023.I^2.R + 5,503.I^2.R^2 \quad (1)$$

Em que:

I = Inclinação;

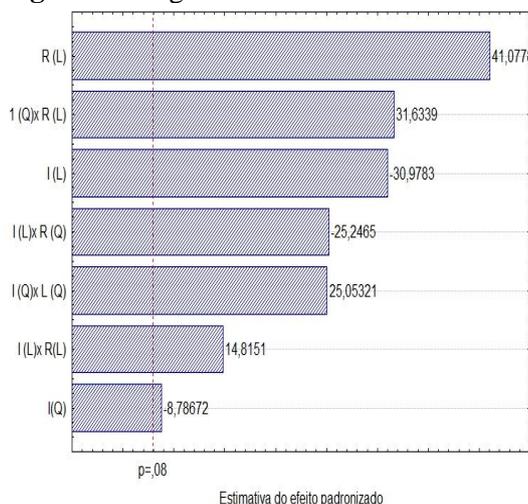
R = Relação  $\left[ \frac{\text{Massa de ligante}}{\text{Massa de fosfogesso}} \right]$ ;

G = Granulometria.

De acordo com o modelo as variáveis que mais influenciam o sistema são: relação (m/m) linear, inclinação linear e inclinação quadrática x Relação (m/m) linear. A interação da inclinação quadrática se mostrou de pouca influência, porém quando esta era retirada da análise ocorria a insignificância de algumas interações, portanto não houve a necessidade de sua retirada.

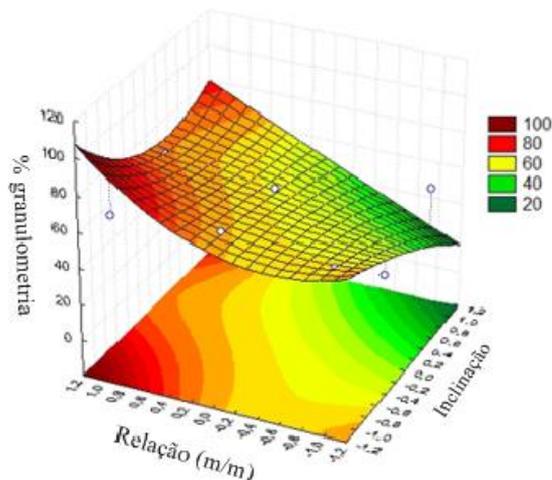
Também foi feito o diagrama de Pareto onde fica nítido as variáveis que mais influenciam no processo, comprovando o que foi observado através do modelo, ele está explícito na figura 3.

**Figura 3:** Diagrama de Pareto.



A fim de observar a influência das variáveis analisadas no presente trabalho, foi plotada a superfície de resposta respectiva ao modelo proposto e que se encontra na figura 4.

**Figura 4:** Superfície de resposta para planejamento.



De acordo com a superfície de resposta pode-se analisar alguns critérios mais específicos. Em relação a inclinação a que obteve resultados mais satisfatórios quanto à granulometria foi o ângulo de 45°, cuja codificação é -1,0, já que ao observar a figura 4, todas regiões situadas no ângulo especificado obtiveram cores avermelhadas que, pela legenda, é uma região com maior % granulométrica. Logo em seguida, o ângulo de 55° (codificação 0), obteve valores considerados bons, porém inferiores ao ângulo de 45°, e o ângulo de 65° foi o que obteve as piores análises granulométricas.

Quanto ao critério Relação (m/m), os melhores resultados obtidos foram para a maior relação (0,182), cuja codificação é 1,0, e a menor relação (0,098) obteve resultados não tão satisfatórios.

Portanto, é possível dizer que a melhor configuração dentre as testadas no presente trabalho é o ângulo de 45° com relação (m/m) maior, sendo 45,5 g de fécula de mandioca para 250 g de fosfogesso.

## 4 CONCLUSÃO

Neste projeto, foi desenvolvido o aparato experimental, bem como testes que comprovassem a qualidade de seu funcionamento. O equipamento desenvolvido no presente trabalho obteve o resultado esperado. Dentre os parâmetros manipuláveis no processo de granulação, foram escolhidas velocidade e inclinação do disco, sendo estes projetados de forma a se obter funcionamentos extremos, ou seja, inclinação de 0 à 90° e velocidade de 22 rpm à aproximadamente 200 rpm.

Em relação ao procedimento experimental, alguns resultados não seguiram uma característica padrão, isso pode ter ocorrido devido a erros sistemáticos, como possível variação de velocidade de rotação do disco e também a não aspensão constante da solução de hidróxido de sódio. Esses erros são decorrentes em função de que o processo em questão é sensível a pequenas mudanças de operação do sistema e o resultado experimental é dependente da forma que cada operador segue o procedimento.

Neste trabalho foi possível desenvolver um planejamento fatorial  $3^2$  e obter um modelo que represente a granulometria obtida em função da inclinação e concentração de solução ligante no processo. Com base no modelo foi obtida uma superfície de resposta em que a melhor resposta é para inclinação de 45° e concentração de 0,182g fécula/g fosfogesso. Os resultados também mostraram que a relação de 0,098g fécula/g fosfogesso não gerou bons valores, sendo possível dizer que o mesmo é fundamental para a formação dos grânulos no processo.

Após todos os argumentos apresentados e discutidos, pode-se dizer que o trabalho alcançou seus objetivos obtendo um granulador com boa faixa de trabalho e passível de variação de parâmetros, bem como resultados satisfatórios para o processo

de granulação de fosfogesso com fécula de mandioca como ligante.

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Michele Morais. **Relatório Técnico Complexo de Piaçaguera**. Piaçaguera: Vale Fertilizantes, 2010.

BERNARDES L. J. L. **A Granulação de Materiais. Cerâmica Industrial**, Piracicaba SP, Junho 2006.

COUTO, A. G.; ORTEGA, G. G.; PETROVICK, P. R. **Granulação**. Programa de Pós-graduação em Ciências Farmacêuticas, Faculdade de Farmácia, 2000.

GONÇALVES, C. R. **Granulação de Fertilizantes: Influência de Variáveis de Processos na Granulometria dos Grânulos**. 2011. Trabalho de conclusão de curso, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

Organização das Nações Unidas (ONU), Perspectivas de população mundial, 2013. Disponível em: <http://internacional.estadao.com.br/noticias/geral,onu-populacao-mundial-e-de-7-2-bilhoes-de-pessoas,1042156>. Acesso em: 07 jun. 2015.

Organização das Nações Unidas (ONU), World Urbanization Prospects. Relatório das nações 2014. Disponível em: <http://www.unric.org/pt/actualidade/31537-relatorio-da-onu-mostra-populacao-mundial-cada-vez-mais-urbanizada-mais-de-metade-vive-em-zonas-urbanizadas-ao-que-se-podem-juntar-25-mil-milhoes-em-2050>. Acesso: 07 jun. 2015.