

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**PROCESSAMENTO E
ESTABILIDADE DE RAÇÕES
ATRAVÉS DA DIMENSÃO FRACTAL**

ANSELMO JOSÉ SPADOTTO

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas do Câmpus de Botucatu-
UNESP, para obtenção do título de Doutor
em Agronomia, Área de Concentração:
Energia na Agricultura.

BOTUCATU - SP
Janeiro - 1998

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**PROCESSAMENTO E
ESTABILIDADE DE RAÇÕES
ATRAVÉS DA DIMENSÃO FRACTAL**

ANSELMO JOSÉ SPADOTTO

Orientador: Prof Dr. Odivaldo José Seraphim

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas do Câmpus de Botucatu-
UNESP, para obtenção do título de Doutor
em Agronomia, Área de Concentração:
Energia na Agricultura.

BOTUCATU - SP
Janeiro - 1998

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO DE AQUISIÇÃO E
TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO
DIRETORIA DE SERVIÇO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - FCA
UNESP - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

S732p Spadotto, Anselmo José
Processamento e estabilidade de rações através da
dimensão fractal. -- Botucatu, 1998
v, 104 f. : il. ; 28 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 1998
Orientador: Odivaldo José Seraphim
Bibliografia: f. 89-99

1. Fractal - Caos 2. Ração animal - Processamen-
to 3. Fórmula Spadotto 4. MC-D - Método para deter-
minar dimensão fractal I. Título

CDD (21) 514.742

Palavras-chave: Fractal; Caos; Ração animal; Fórmula
Spadotto; MC-D

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

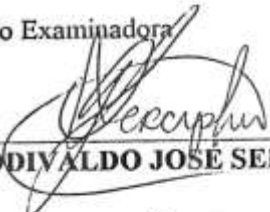
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "PROCESSAMENTO E ESTABILIDADE DE RAÇÕES ATRAVÉS DA DIMENSÃO FRACTAL"

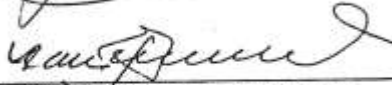
AUTOR: ANSELMO JOSÉ SPADOTTO

ORIENTADOR: PROF. DR. ODIVALDO JOSÉ SERAPHIM

Aprovado pela Comissão Examinadora



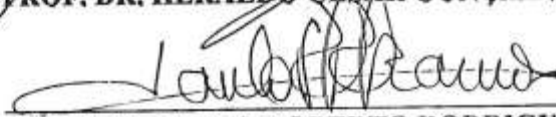
PROF. DR. ODIVALDO JOSÉ SERAPHIM



PROF. DR. IVAN AMARAL GUERRINI



PROF. DR. HERALDO CÉSAR GONÇALVES



PROF. DR. PAULO ROBERTO RODRIGUES RAMOS



PROF. DR. JOÃO DA COSTA CHAVES JÚNIOR

Data da Realização: 23 / JANEIRO / 1998 .

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Ivan Amaral Guerrini pela sua amizade e dedicação profissional.

Ao Professor Odivaldo José Seraphim pela confiança em mim depositada.

Aos Professores Paulo Roberto Rodrigues Ramos, João Chaves da Costa Jr,

Nelson Miguel Teixeira, Heraldo Cesar Gonçalves, Nelson Miguel Teixeira,

Marco Antonio de Rezende.

Aos professores e funcionários do Departamento de Física e Biofísica pela

acolhida quando iniciei neste departamento.

A coordenação e funcionários do curso de pós-graduação - Energia na Agricultura - que

possibilitou o desenvolvimento deste projeto em curto tempo.

Aos professores, Mário de Beni Arrigini, José Martinez, , João Chaves, Joaquim Odilon

Pereira.

Ofereço

A Nossa Senhora, que me inspirou no momento certo.

A minha esposa Marly.

A minha família.

A todos os homens que compreendem a dignidade do seu semelhante.

SUMÁRIO

	página
1. RESUMO	1
SUMMARY	
2. INTRODUÇÃO	5
3. REVISÃO DE LITERATURA	9
3. 1. Rações	9
3. 1. 1. Energia e Agricultura	9
3. 1. 2. Ingredientes de rações	10
3. 1. 3. Análise químicas de minerais	12
3. 1. 4. Processos de misturas alimentares	12
3. 1. 5. Tempo de mistura	13
3. 1. 6. Características físicas dos ingredientes de rações	15
3. 1. 7. Exames de rações	24
3. 1. 8. Tipos de misturadores	29
3. 2. Fractais	32
3. 2. 1. Grandezas físicas, dimensões e suas relações	32
3. 2. 2. Fractais: origem e modelos clássicos	35
3. 2. 3. Fractais e materiais porosos	36

4. MATERIAIS E MÉTODOS	45
4. 1. Materiais	45
4. 1. 1. Solos	45
4. 1. 2. Ingredientes de rações animal	45
4. 1. 3. Misturador de rações	46
4. 1. 4. Analisador de composição química mineral	46
4. 2. Métodos	47
4. 2. 1. Desenvolvimento da fórmula Spadotto	47
4. 2. 2. Testando a fórmula Spadotto	48
4. 2. 3. Desenvolvendo o método para materiais porosos	52
4. 2. 4. Avaliação da eficiência da mistura	54
4. 2. 5. Análise dos Dados	55
5. RESULTADOS	56
5.1. Ajuste da fórmula proposta	56
5. 2. Ajuste do MC-D	58
5. 3. Caracterização dos ingredientes pela dimensão fractal	59
5. 4. Avaliação da eficiência da mistura	59
6. DISCUSSÃO	61
6. 1. Energia e Agricultura	61
6. 2. Ingredientes de rações	62
6. 3. Análises químicas de minerais	62
6. 4. Processos de misturas alimentares	63
6. 5. Tempo de mistura	63

6. 6. Características físicas dos ingredientes de rações	65
6. 7. Exames de rações	67
6. 8. Tipo de misturador	69
6. 9. Cuidados no processamento de rações	71
6. 10. Caráter prático deste experimento	71
6. 11. Grandezas físicas, dimensões e suas relações fractais	72
6. 12. Unidade fractal e Matriz fractal	73
6. 13. Fractais: origem e modelos clássicos	74
6. 14. Comportamento da densidade aparente	76
6. 15. Ligações entre MF, UF, UFE e V_2 , M em mat. porosos	77
6. 16. Ajuste do MC-D	78
6. 17. Relações de D, tamanho de partículas e o MC-D	79
6. 18. Relações de D e d_2 pelo MC-D	80
6. 19. Cuidados na aplicação do MC-D	81
6. 20. Expansão do MC-D	82
6. 21. Perspectivas no emprego da dimensão fractal	83
6. 22. Racionalização de energia processamento de rações	83
6. 23. Homogeneidade e dimensão fractal	84
6. 24. Campo de pesquisas e tecnologia	86
7 CONCLUSÕES	87
8. LITERATURA CITADA	89
APÊNDICE	100
Apêndice 1: Quadros	100
Apêndice 2: Modelos clássicos de fractais	104

1. RESUMO

Este trabalho é justificado pelas crescentes necessidades de: a) Racionalização de energia a nível mundial e nacional; b) Melhoria da competitividade industrial brasileira frente à globalização da economia; c) Melhoria da qualidade das rações animal; d) Indiretamente, pela melhoria da performance nos índices zootécnicos.

Aplicando-se os conceitos e a fórmula aqui desenvolvida — a Fórmula Spadotto para determinar a dimensão fractal, $D = \log(V_2) / \log(M^{(1/b)})$, também expressa como $D = \log(V_2) / \log(M^{(1/b)})$ ou $D = \log(V_2) / \log(\sqrt[b]{M})$ —, criada e desenvolvida pelo pesquisador Anselmo José Spadotto, obtiveram-se os exatos valores de dimensões fractais para os modelos clássicos, sendo exatos quando comparados com a dimensão de Hausdorff. Ainda, a flexibilização da fórmula $D = \log(V_1) / \log(\sqrt[b]{d_2} \cdot V_2)$ permite determinar com exatidão as dimensões inteiras, se os modelos acima forem transformados em euclidianos ou inteiros. Portanto, a fórmula desenvolvida tem a propriedade de caracterizar pela dimensão, com exatidão um sistema fractal ou um sistema inteiro.

O tempo de mistura foi o mesmo além das outras variáveis, para estes ingredientes a dimensão fractal teve fundamental importância na velocidade de homogeneização com consequente racionalização no uso de energia.

Os resultados mostraram que: a) Os conceitos e a fórmula básica propostos podem ser aplicados nos trabalhos com dimensão fractal, assim como, na determinação da dimensão euclidiana; b) O método prático para determinar a dimensão fractal (MC-D) apresentou resultados precisos dentro da literatura especializada, porém, não existem parâmetros para testar a sua exatidão no presente momento; c) A mistura de ingredientes de rações com dimensões fractais mais distantes entre si, foi mais eficiente e pode economizar energia no processamento, enquanto que a mistura de ingredientes com dimensões fractais mais próximas podem segregar; d) Por extensão do item “c”, infere-se que a estabilidade física no armazenamento de rações pode sofrer influência da dimensão fractal dos ingredientes; e) Um vasto campo de pesquisas e desenvolvimento tecnológico estão se abrindo com as perspectivas evidenciadas neste trabalho.

PROCESSMENT AND STABILITY OF RATIONS THROUGH FRACTAL

DIMENSION. Botucatu, 1997. 116p. Tese (Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: Anselmo José Spadotto

Adviser: Prof. Dr. Odivaldo José Seraphim

SUMMARY

This work is justified by the growing needs for: a) Energy rationalization at worldwide and national levels; b) Improvement of Brazilian industrial competitiveness in the face of economic globalization; c) Improvement of animal feed quality; d) Indirectly, by improving performance in zootechnical indexes.

Applying the concepts and the formula developed herein—the Spadotto Formula for determining the fractal dimension, $D = \log(V_2) / \log(M^{(1/b)})$, also expressed as $D = \log(V_2) / \log(M^{(1/b)})$ ou $D = \log(V_2) / \log(\sqrt[b]{M})$ —, created and developed by researcher Anselmo José Spadotto, the exact fractal dimension values for classical models were obtained, proving precise when compared to the Hausdorff dimension. Furthermore, the flexibility of the formula $D = \log(V_1) / \log(\sqrt[b]{(d_2.V_2)})$ allows for the exact determination of integer dimensions, if the aforementioned models are transformed into Euclidean or integer systems. Therefore, the developed formula has the property of accurately characterizing a fractal system or an integer system by its dimension.

The mixing time was the same, in addition to the other variables; for these ingredients, the fractal dimension was of fundamental importance to the homogenization speed, with a consequent rationalization of energy use.

The results showed that: a) The proposed concepts and basic formula can be applied to works involving fractal dimension, as well as in determining Euclidean dimension; b) The practical method to determine the fractal dimension (MC-D) presented precise results within the specialized literature, although there are no parameters to test its accuracy at the present moment; c) The mixing of feed ingredients with fractal dimensions farther apart from each other was more efficient and can save energy during processing, whereas the mixing of ingredients with closer fractal dimensions may segregate; d) By extension of item "c", it is inferred that the physical stability during feed storage may be influenced by the fractal dimension of the ingredients; e) A vast field of research and technological development is opening up with the prospects highlighted in this work.

Keywords: fractal, Spadotto's formula, energy, mixing,

2. INTRODUÇÃO

Mais uma vez, é noticiado a importância da racionalização de energia nos dias atuais. Desta feita, foi no jornal “Hoje em Dia”, um dos importantes jornais brasileiros, editado em dia 15 de julho de 1997, que fazia a cobertura da 49ª Reunião Anual da SBPC. O texto foi o seguinte: “A fim de enfrentar o desperdício de US\$ 5 bilhões em eletricidade, calculado pela Eletrobrás, e desenvolver métodos para utilização inteligente de energia, o Instituto Nacional de Tecnologia (INT) desenvolveu um projeto de reestruturação e reeducação, em níveis doméstico e industrial, que conta inclusive com apoio estrangeiro e está disponível a todos... Segundo o INT, atualmente o carro-chefe é o estudo de alternativas que possibilitem o uso racional da energia em todas as suas formas: Energia não pode ser armazenada, por isso temos de saber economizá-la para não sofrer as conseqüências... *Sebrae*, *Senai*, *Eletrobrás*, *GTZ* (agência alemã de financiamento à pesquisa científica em países emergentes), entre outras empresas, se uniram para proporcionar os subsídios para o INT desenvolver suas pesquisas na economia e racionalização de energia...”

Segundo publicação do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) realizada conjuntamente com o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) em dezembro de 1996, a distribuição de apropriações orçamentárias governamentais segundo o objetivo sócio-econômico, o investimento do Brasil em energia referente a 1994/1995 correspondeu a 5,4% contra 4,2% dos Estados Unidos, 4,3% da Alemanha 20,5% do Japão. Assim, mais uma vez, mostrando o interesse dos governos na premência de se desenvolver nova tecnologia nesse setor.

Esta tese também está de acordo com o plano 2015, plano este que está de acordo com a tendência nos países desenvolvidos para racionalizar energia. Esta racionalização, entretanto, é no sentido do aumento da eficiência energética a partir do uso intensivo de novas tecnologias, como é o caso da aplicação de fractais.

A Teoria dos Fractais tem sido empregada em inúmeras áreas de atividades de pesquisa e industrial, possibilitando obter novos parâmetros que servem para o aperfeiçoamento das técnicas hoje existentes. O entendimento de fenômenos naturais ou de procedimentos empregados pelo homem pode ter a colaboração deste novo ramo da ciência. Sendo o sistema em estudo um sistema fractal, os valores da dimensão fractal podem relacionar-se com o conjunto dos parâmetros envolvidos, esclarecendo fatos até então desconhecidos ou tomados como caóticos.

Aparentemente, a mistura de pequenas partículas sólidas nos mais variados tipos de misturadores industriais, como no caso de misturas de rações, apresenta

característica caótica. Hoje, este importante ramo da indústria mundial avalia o seu grau de eficiência, basicamente, valendo-se das seguintes análises: desempenho animal, análises laboratoriais dos componentes e produtos das misturas, tempo gasto no processamento, desgaste dos equipamentos, consumo de energia para funcionar as máquinas, custo de produção e segregação na estocagem. A esta dificuldade de estabelecer-se um melhor controle da eficiência dessa indústria, deve-se considerar-se que as características físico-químicas da matéria-prima muda constantemente em função da oferta do mercado, quer pelo preço ou pela variação sazonal da produção das indústrias primárias. Portanto, um meio de análise prático que integre as variações de mercado e eficiência de processamento e armazenamento faz-se necessário.

A dimensão fractal tem sido empregada, dentre outras áreas, para caracterizar fenômenos e procedimentos naturais e artificiais caracterizados como sistemas dinâmicos. O processo de mistura de rações empregados pode vir a ser caracterizado por um conjunto de dimensões fractais, de modo que os parâmetros de análises supra citados possam ser englobados num procedimento prático de determinação fractal. Assim, a dimensão fractal poderia agilizar o processo de identificação de uma mistura de alimentos reduzindo-se os gastos com o consumo de energia, diminuição da segregação durante e após o processo de mistura, além de otimizar os processos industriais e, indiretamente, os índices zootécnicos.

Em vista do exposto, esta tese tem como hipótese relacionar o processo de mistura de ingredientes sólidos de rações com a dimensão fractal das partes e do todo. Para tanto, pretende-se atingir três objetivos: a) Desenvolver uma fórmula básica para determinar a dimensão fractal; b) Desenvolver um método prático para determinar a dimensão fractal em materiais porosos como ingredientes de rações; c) Melhorar a eficiência no processamento e na estabilidade de rações valendo-se dos dois objetivos anteriores.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3. 1. Rações

3. 1. 1. Energia e Agricultura

Muitos trabalhos foram realizados buscando esclarecer a verdadeira situação energética do país e isso vem ocorrendo mais intensamente desde a década de setenta. Goldemberg (1979), dentre outros, e o próprio Ministério da Indústria e Comércio, alertaram, desde então, para um crescente consumo sem o correspondente investimento na produção, indicando um risco ao sistema produtivo em geral. O panorama apresentado pelo IBGE (1985) tem uma realística mostra que, se fosse projetada há alguns anos, levaria a conclusões não muito favoráveis. Hoje, aproximadamente 20 anos após esses debates, a palavra de ordem é “o uso racional de energia”. Assim, como resultado desse período passado, o Brasil, assim como o mundo de um modo geral, vive a expectativa de economizar energia para manter o seu sistema industrial e econômico funcionando.

Particularmente na agroindústria, onde grandes variações sazonais ocorrem paralelamente às condições naturais não previsíveis, o uso racional de energia

apresenta-se com características singulares com relação às outras indústrias. A amplitude da energia utilizada no sistema total de alimentos pode ser visualizada em Cereda & Sanches (1985). Segundo esses autores, a produção, o processamento, o armazenamento, a distribuição e o consumo de alimentos requerem cerca de 16% do consumo total de energia em um país desenvolvido. Desses 16%, cerca de 20% é utilizado durante a fase de produção e o restante 80%, durante a fase pós-colheita. Assim, com valores tão expressivos, economizar energia no processamento agro-industrial não fugirá da diretriz geral que abrange o Brasil e o mundo como um todo, conforme previsto por muitos pesquisadores (Assumpção, 1986; Instituto de Economia Agrícola, 1989; Rodriguez, 1990). Num trabalho recente, Seraphim (1997) amplia os conceitos completando que conservar energia implica na transformação da sociedade do desperdício numa sociedade mais racional na utilização de seus recursos globais, especialmente os insumos energéticos. Já visualizando relacionar uso racional de energia com as características físicas dos ingredientes, Spadotto et al. (1997c) ampliam a expectativa de trabalhos promissores na área agrícola.

3. 1. 2. Ingredientes de rações

Segundo National Research Council (1970) a identificação completa de um alimento consta de oito componentes: a) material-padrão ou de origem; b) espécie; c) parte utilizada; d) processo(s) de tratamento(s); e) estado de maturação; f) número de ordem da produção; g) grau de qualidade; h) classificação. Essa mesma fonte de

referência, cita as seguintes classes de alimentos: a) forragem seca; b) pastagem; c) silagem; d) alimento energético; e) suplementos protéicos; f) minerais; g) vitaminas; h) aditivos. As classes a, b e c compreendem os alimentos volumosos, os quais são aqueles que possuem mais de 18% de fibra, quando esta é expressa em base da matéria seca. Quanto ao conteúdo proteico, os alimentos são subdivididos em: Alimento básico - que têm menos de 20% de proteína e a função dentro da ração é fornecer energia (classe d); Suplementos proteicos - são concentrados com mais de 20% de proteína (classe e). Nas classes f e g estão os suplementos vitamínicos e minerais. A classe h compreende os aditivos e inclui todas as substâncias ou drogas naturais ou sintéticas.

Segundo Liroyd et al. (1982) e Andriguetto et al. (1985), os minerais podem ser empregados na alimentação animal de dois modos: como alimentos prontos na forma de sal mineral, ou como núcleos de rações prontas, sendo ou fazendo parte de premix.

3. 1. 3. Análises químicas de minerais

As análises químicas e energéticas utilizadas na avaliação dos alimentos são classificadas em análises bromatológicas comuns, determinação do valor energético, análise de minerais, análise de vitaminas e análise de aminoácidos. A análise de minerais, tanto dos macros como dos micros, atualmente é realizada com grande precisão pela técnica de absorção atômica. Os macrominerais são expressos em

percentagens dos ingredientes e os microminerais na base de miligrama por quilograma de alimento ou partes por milhão (ppm) (National Research Council, 1970), Liroyd et al., 1982, Islabão, 1984).

3. 1. 4. Processos de misturas alimentares

No processamento de alimentos, o consumo de energia, a qualidade do produto, a segregação na estocagem e o tempo de mistura têm motivado inúmeras pesquisas científicas sob muitos aspectos. Segundo Axe (1995) no seu trabalho que é importante referência nesta área, a indústria de alimentos tem desejado produzir uma uniforme e duradoura mistura de ingredientes. Isto tem influenciado a indústria de alimentos, tanto a animal como a humana, à competição para a otimização da performance, dos produtos e dos serviços diferenciados. O dilema, contudo, continua o autor citado, é que a indústria de alimentos é capaz de formular mais precisamente os alimentos e no mínimo custo, no papel, em relação ao que podem produzir rotineiramente nos seus misturadores de alimentos em termos práticos. Ainda nesse trabalho, o autor conclui que os ingredientes são a chave para se produzir uma mistura homogênea. As características dos ingredientes e interação com cada outro, continua ele, determinará como será controlado o processo de mistura, e segregação no armazenamento.

3. 1. 5. Tempo de mistura

No processo de fabricação de rações animal, e mesmo de alimentos em geral, o tempo de mistura desempenha importante papel em termos de eficiência industrial e qualidade do produto.

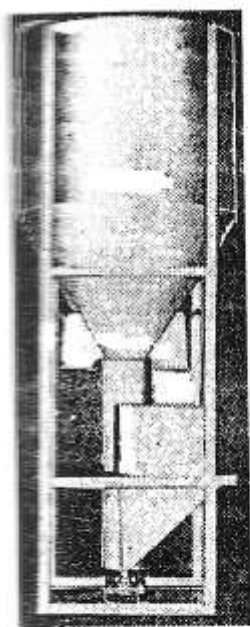
Foi na década de 70, quando a competitividade neste setor aumentou na chamada internacionalização industrial, que começaram a surgir uma quantidade maior de trabalhos nessa área. Dentre eles, McElhiney (1982) apresentou uma das primeiras sugestões práticas recomendando um tempo mínimo de 15 minutos de mistura após a adição do último ingrediente, quando o misturador estiver bem ajustado. Nesse sentido, cita a existência de vários fatores que afetam a qualidade da mistura, tais como: tempo insuficiente de mistura, ajustamento impróprio do misturador e características físicas do material a ser misturado, principalmente quando micronutrientes são empregados.

Segundo Lopes et al. (1984), não há critério na determinação do tempo em que o misturador deva funcionar, para se obter mistura com máxima homogeneidade. Além dos problemas de misturas incorretas (desmisturas) que podem ocorrer quando o tempo de mistura exceder o indicado, é evidente que venha consumir-se mais energia para fazer funcionar o misturador. Trabalhando com misturador vertical, e analisando o tempo de mistura e a homogeneidade de rações animal, estes autores fizeram as seguintes observações: Que não houve diferença estatística significativa ($P > 0.05$) entre os tempos de mistura (5, 10, 15, 20, 25, e 30 minutos)

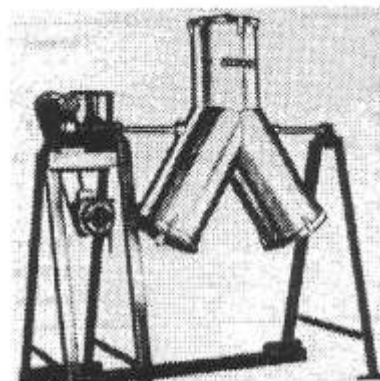
quando se analisaram proteína bruta, matéria mineral, fósforo, cálcio, sódio, potássio, magnésio, manganês, cobre, ferro e zinco das rações, exceto para energia bruta e fibra bruta. Os valores de energia bruta tenderam a crescer com o tempo de mistura, atingindo o valor máximo aos 20 minutos (4147 Kcal/kg), enquanto os valores de fibra bruta comportaram-se de maneira inversa, atingindo um mínimo (2,29%) naquele tempo. Quando as médias encontradas das análises das rações, nos diferentes tempos de mistura, foram comparadas com aquelas esperadas, pôde ser observado que, para proteína bruta, fibra bruta e média mineral, os resultados foram semelhantes. Entretanto, quando os minerais foram analisados separadamente, observou-se que a maioria das médias apresentaram grandes variações, exceto as observadas para o cálcio e magnésio. Neste sentido, fazendo parte da conclusão desse trabalho, estes autores citam que não houve tendência à maior homogeneidade da ração com o aumento do tempo de mistura.

Muitos dos tipos de misturadores existentes têm performance satisfatória, mas cada misturador precisa funcionar por tempo suficiente. Dependendo do tipo de misturador, o intervalo de funcionamento após a adição do último ingrediente varia entre 15 a 30 minutos (Mc Ellhiney, 1985).

Num trabalho detalhado nessa linha de pesquisas, Poux et al. (1991) determinam os tempos recomendados para diferentes tipos de misturadores. Para os de tipo vertical e horizontal com rosca sem fim o tempo recomendado varia de 5 a 30 minutos, enquanto que para os de tipo “Y” ou “V” os autores recomendam de 1 a 10 minutos, após o último ingrediente ser carregado.



Misturador Tipo Vertical



Misturador Tipo “Y”

3. 1. 6. Características físicas dos ingredientes de rações

Os fatores citados anteriormente - tempo de mistura e ajustamento do misturador - dependem basicamente do terceiro fator que se refere às características físicas do material. Quando mal feita, as misturas de micronutrientes, onde

partículas muito pequenas de sólidas são adicionadas em grandes volumes, podem constituir-se em eventuais prejuízos na performance produtiva dos animais.

Pfost (1976) num trabalho que é referência nesta área de pesquisa, relaciona as cinco características das partes de uma mistura que interferem na composição final de uma ração : tamanho da partícula, peso específico, higroscopicidade, susceptibilidade à cargas elétricas e adesividade da partícula.

Uma pré-mistura, medida adotada por muitos técnicos, segundo Mc Ellhiney (1982) ainda pode melhorar a qualidade do produto, mesmo com ingredientes mal selecionados. Continua o autor , dizendo que misturadores verticais são fabricados com uma espiral vertical central que movimenta a massa ali colocada. Neste caso, dependendo das características físicas dos ingredientes, o fluxo mais rápido de alimentos está próximo da espiral e o mais lento próximo da parede lateral do misturador.

Mc Ellhiney (1985) num trabalho desenvolvido para o aperfeiçoamento da tecnologia de processamento de alimentos, enfatiza que da preparação de premix depende grandemente a qualidade de um alimento completo. O processamento de um “premix” precisa ser cuidadoso porque erros podem ser causados pela pressa e podem custar caro. Uma mistura uniforme, de um ou mais micronutrientes, pode ser obtida com a adição de diluentes sólidos e/ou carregador de ingredientes durante o processo de mistura. Assim, “premixes” são usados para facilitar uma dispersão uniforme dos micronutrientes na grande mistura.

Vários são os fatores que afetam a qualidade de uma mistura e que podem provocar um substancial aumento no tempo de processamento. Para Axe (1995) existem oito fatores que afetam a uniformidade de uma mistura, sendo esses citados abaixo.

a) Tamanho de partículas: Quando dois ingredientes com tamanho de partículas muito diferentes são misturados, em vez de ocorrer mistura, estes ingredientes podem separar-se. Tamanho de partícula é de longe o mais importante dos fatores inerentes aos ingredientes. Uma mistura de partículas de tamanhos diferentes pode segregar através de 5 mecanismos diferentes:

a.1) Trajetória: Este mecanismo pode causar segregação numa mistura na qual partículas são elevadas fora de uma massa de material e atiradas em espalhamento lateral ao exterior. Também, as grandes partículas podem mover-se em trajetórias diferentes e isto limitará a qualidade da mistura que pode ser muito prejudicada. Este mecanismo pode também causar segregação no curso do material residual em uma correia de transporte.

a.2) Ângulo de repouso: Partículas uniformizadas quanto ao tamanho, constituídas por diferentes materiais em uma mistura podem segregar significativamente durante o empilhamento se o material tem diferentes ângulos de repouso (máximo ângulo em graus que um material retém água). O material tendo o ângulo agudo tende para concentrar-se no centro, quase todo o tempo, e o material com ângulo alisado à concentrar-se no exterior da massa. Segregação causada pelo ângulo do mecanismo

de repouso freqüentemente amplia uma segregação causada pelo tamanho de partículas, porque partículas finas têm grandes ângulos de repouso comparadas com partículas grossas de um mesmo material.

a.3) Percolação ou peneiramento das partículas finas: Se uma massa de partículas é perturbada ocorre uma sucção fazendo um caminho que partículas percorrem, uma reorganização que acontece no ato de embalar. De tempo em tempo, aberturas entre partículas são produzidas, permitindo que uma partícula que está sobre outra venha a cair, e uma partícula em algum outro lugar mover-se para cima. Se a massa de pó contém partículas de diferentes tamanhos, isto acontecerá facilmente fazendo uma partícula grande cair para o interior da próxima camada. E assim será formado o caminho para pequenas partículas moverem-se descendentemente, em direção à segregação. Para estes efeitos ocorrerem, é necessário que finas e pequenas partículas passem através de vazios formados entre grandes partículas quando elas estão no repouso; uma pequena diferença no tamanho é suficiente para provocar segregação numa certa região. Percolação pode ocorrer sempre que a mistura de partículas de diferentes tamanhos é perturbada semelhantemente ao rearranjo das partículas. Isto pode não acontecer durante a agitação, tremor e vibração feitas para promover a mistura de líquidos, mas causa separação dos componentes sólidos, quando tratar-se de partículas de diferentes tamanhos envolvidas. Segregação no empilhamento é de semelhante importância e merece devida atenção. Isto acontece quando a mistura de partículas de diferentes tamanhos é moldada formando um cone

numa pilha ou monte, observando-se que as grandes partículas tendem para correr em sentido descendente para a borda do monte. A extensão deste fato para que tal segregação ocorra no interior do monte, contudo, geralmente não acontece. Quando o material é amontado sobre o topo de um monte este forma uma camada de partículas, de acordo com o número de pequenas partículas e seus diâmetros, no qual elas têm muitos gradientes de velocidade. Esta camada eficientemente forma um anteparo através do qual as grandes partículas são capazes de passar para a região estacionária abaixo. A facilidade da passagem é uma função do tamanho da partícula e sua direção, sendo maior também em função do tamanho do monte. Isto é muito frequente e séria causa de segregação de tamanhos de partículas.

a.4) Elevação de partículas grossas em vibração: Em adição ao efeito de percolação, este é outro mecanismo de segregação, quando a massa contém partículas de diferentes tamanhos em vibração. Isto pode ser demonstrado pelo lugar ocupado pelas grandes partículas no fundo e sobrepostas por uma camada de pequenas partículas; na vibração, as grandes partículas podem mover-se por elevação para a superfície. Este efeito ocorre invariavelmente se grandes partículas são mais densas que as partículas finas. De fato, a densidade de partículas grandes facilita a segregação visto que é induzida pela elevação das mesmas. Isto pode ser explicado pelo fato que partículas grandes causam um aumento de pressão na região abaixo, com conseqüente compactação do material e paradas do movimento das partículas descendentes. Alguns movimentos de subida permitem partículas finas correrem

embaixo das partículas grossas, e estas são fechadas nesta posição. Se a intensidade da vibração é grande, a partícula grande se moverá diretamente acima da superfície.

a.5) Segregação de pó: Quando uma partícula de um material contém uma vasta distribuição em tamanhos, incluindo uma apreciável quantidade de partículas menores que 50µm, e é descarregado dentro e no topo de um depósito ou misturador; o ar contido nesse sistema é deslocado da posição inferior. A velocidade do ar pode ser igual ou exceder a velocidade final das partículas finas, que podem permanecer em suspensão como uma nuvem, após as partículas grandes terem assentado. As partículas finas poderão eventualmente cair fora da suspensão e formar uma camada no topo da camada de partículas grossas. Quando o misturador ou recipiente é esvaziado, uma remanescente quantidade de partículas finas, aparecerá na emergência em curso.

b) Número de partículas: Isto é uma relação entre tamanho de partículas e número de partículas; onde um dado volume ou peso é constante, o número de partículas aumenta quando o tamanho de partículas diminui. Isto é uma relação que promove uniformidade. Usando micro ingredientes com um grande número de partículas pré diluídas, se garantirá adição de partículas por unidade de aumento. Isto pode melhorar a dispersão de micronutrientes.

c) Configuração das partículas: Refere-se a distintas características das partículas: Forma é o grau para o qual uma partícula aproxima-se de uma forma definitiva

semelhante a um cubo, tetraedro ou esfera. Proporção é a medida relativa que distingue um cubo de um tetraedro ou esferoide de outras classes geométricas. Configuração das partículas influencia propriedades semelhantes como fluxo, habilidade de mistura e acondicionamento. Partículas laminadas semelhantes à casca de fruta, são conhecidas por serem difíceis de misturar porque elas interlaçam e formam obstruções ao fluxo. Quando a configuração das partículas é extremamente diferente de outros ingredientes da mistura ela pode tender à segregação, Os mais similares ingredientes pela configuração de partículas, são mais facilmente misturados.

d) Densidade: Quando ingredientes têm ao extremo partículas com densidades diferentes, estas também tendem a segregar-se durante a mistura ou manuseio. As partículas mais densas migram descendentemente através do meio, mais rápidas que partículas menos densas. Portanto, convém que a densidade do premix seja similar ao alimento produzido no qual será incluído.

e) Carga eletrostática: Carga eletrostática também é referida como eletricidade estática, um bem conhecido fenômeno físico e que é facilmente demonstrável. Isto é geralmente menos conhecido que a carga de fricção que é a sua causa. As partículas provavelmente transformam-se em cargas eletrostáticas devido às colisões com outras partículas e/ou a mistura de suas partes durante o processamento das rações. Geralmente, a maior carga eletrostática é carregada pelas partículas finas. A área da superfície superior pode voltar-se para o alto carregando certos ingredientes, com

grossas partículas carregando os ingredientes com baixas cargas. Cargas eletrostáticas são mais importantes e difíceis de se trabalhar durante o inverno do que no verão. Isto é porque a umidade relativa do ar é grande durante o verão; as partículas, então já úmidas, absorvem pouca umidade e tornando-se ligeiramente menos condutivas, que ajuda a atrair menos carga livre. Partículas carregadas podem tanto atrair ou repelir. Se as partículas tem cargas opostas, elas se atrairão. Num premix de certas cargas opostas, elas terão uma tendência para seus componentes se aderirem formando um carregador. Em contraste, as partículas carregadas podem também aderir às partes de metal de misturador, assim causando adicional segregação de tamanho nos ingredientes e causando irregular resultados de misturas.

f) Empoeiramento: Partículas de poeira são um incômodo aos operadores das fábricas, afetam a segurança do local, indicam risco à saúde e predizem perda potencial de microingredientes para o ar ou ao sistema de coleta. Poeira geralmente consiste de minúsculas partículas sólidas e maiores que $1\mu\text{m}$ em média de diâmetro. Consequentemente, o desenho do moinho de alimentos, o sistema de coleta de poeira e a natureza da formulação de cada alimento influenciam a magnitude da poeira em perdas. Disto é conhecido que, micro-ingredientes devido ao fino tamanho das partículas, podem ser colocados fora da formulação de alguns alimentos se a fração fugitiva de poeira não é imediatamente aderida pelas partículas mais densas e carregadas durante o processo de mistura. Por esta razão, é recomendado que a

performance do processamento de alimentos seja regularmente analisada quanto a poeira que possa ser coletada, para determinar qual ingrediente ativo específico estão presentes e em quais níveis.

g) Higroscopicidade: Uma propriedade comum às pequenas partículas sólidas podendo agir em afinidade com a umidade atmosférica. Um significativo aumento desta umidade de um ingrediente pode resultar em um número de mudanças de propriedades físicas, semelhantes ao torrão ou pedaço de terra, reduzindo número de partículas, aumentando o tamanho e a densidade destas. Isto pode seriamente atrapalhar a habilidade de um ingrediente em distribuir-se ou misturar bem, dentro do conjunto de ingredientes.

h) Escoamento: Muitos técnicos preferem um premix o qual é facilmente esgotado ou derramado dos misturadores, dando a entender que existe uma continuidade no processo de mistura. O formulador de premix esforça-se para prover a indústria de alimentos com fácil escoamento. Alguns fatores discutidos anteriormente podem favorecer o escoamento, como tamanho de partícula, forma, densidade, higroscopicidade e carga elétrica.

Misturar componentes de dieta faz parte do processo produtivo na criação de animais domésticos. Entretanto, apesar da fundamental importância que o processamento de alimentos tem na produção animal, muitos trabalhos científicos dessa área não contemplam com o rigor necessário esta parte do experimento. Spadotto et al. (1996a), trabalhando com bovinos em regime de confinamento,

adotaram na metodologia padronizar o método de mistura dos ingredientes da ração, entendendo que a qualidade da mistura dos ingredientes da dieta interfere não somente no consumo por parte dos animais, como também na performance dos mesmos.

3. 1. 7. Exames de rações

Já no início da década de cinquenta, com a corrida de expansão industrial do pós-guerra, Danckwerts (1953) notou a importância do estabelecimento da escala de exame de ingredientes de alimentos a serem misturados. Assim, a definiu como o “mínimo tamanho da região de segregação na qual poderia a mistura ser observada como imperfeitamente misturada”. Posteriormente, ele mostrou que a situação não era tão simples como a discussão sugere, visto que mistura não homogênea é determinada não somente pelo tamanho da região de mistura imperfeitamente misturada, mas, também pela intensidade de segregação entre estas regiões. Na prática, isto pode limitar-se a não mais que uma estimativa aproximada da escala de exame, mas o conceito é usado na definição da qualidade de uma mistura. Segundo o mesmo autor, estabelecendo uma escala apropriada de exame para o produto e o uso de elementos fixos como ingredientes, o tamanho ou volume final seria usado para avaliar a qualidade da mistura.

A qualidade de uma mistura depende muito da escala na qual é examinada. Por exemplo, uma amostra de tinta pode parecer ser uma mistura homogênea quando examinada a olho nu, porém, quando observada em ampliação, torna-se evidente que é composta de camadas divididas em pequenas partículas. Um exemplo usado por Harnby (1985) é o da mistura de micronutrientes para formar uma dieta para alimentar animais. Se a primária preocupação é a de garantir que cada animal receba a correta quantidade de nutriente por dia, então a escala apropriada de exame para que a mistura seja analisada será o consumo diário por animal da dieta. Entretanto, se o critério é que o nutriente ingerido seja controlado na semana, então a escala de exame deve ser fechada como o consumo semanal da ração. No último caso, foi possível considerar variações na concentração de nutrientes entre alimentação diária, mas em cima da média do total dos nutrientes ingeridos na semana satisfaz o requerimento completo. Num outro plano alimentar, se tratar-se de uniformização de cores e textura, por exemplo, então a escala de exame será muito reduzida.

Fan & Chen (1990) num trabalho que foi considerado na época como a revisão que envolveu o maior levantamento sobre misturas sólidas desde 1976, dividiu seus objetivos dentro de três grandes categorias: caracterização de estados de misturas sólidas, taxa e mecanismos e processos de misturas sólidas e desenho de misturadores. Concluíram que a homogeneidade de uma mistura de sólidos ou distribuição dos seus componentes é frequentemente qualificada por um índice de mistura. Muitos dos índices de mistura são baseados na variação da concentração de

uma certa quantidade ou componente chave no meio de pontos de amostras. Estes índices de mistura, entretanto, somente podem descrever o macroscópico comportamento de uma mistura de sólidos. Com este método, é difícil de visualizar os detalhes estruturais de uma mistura - pontos de contato ou área entre partículas de diferentes fases dos sólidos - através de avaliação dos índices. Todavia, devido às características complexas de uma mistura de sólidos, alguma avaliação de índices de mistura parece ser de longe satisfatória. Os três maiores mecanismos de mistura, difusão, convecção e difusão-convecção, têm sido proposto para mistura de sólidos. Vários modelos matemáticos para estes mecanismos foram sugeridos, e numerosas expressões matemáticas para as taxas de mistura sólidas baseadas nestes mecanismos têm sido desenvolvidas. Isto pode ser atribuído à dificuldades em delinear a inerente e natural complexidade do processo de mistura de sólidos pela média aproximada. Ainda que considerável progresso tenha sido feito no entendimento de processos de mistura de sólidos, o desenho dos misturadores não tem acompanhado esta evolução. Isto tem ocorrido devido à complexidade dos processos de mistura de sólidos, incorporando somente alguns dos muitos parâmetros envolvidos.

Poux et al. (1991) realizaram investigações com misturas e armazenagem de sólidos com granulometria muito pequena, ou com pós, examinando diferentes tipos de misturadores, particularmente em práticas usadas em indústrias. Os autores analisaram os pontos essenciais para a mistura de sólidos e as definições de

qualidade de uma mistura, mecanismos de mistura, as possibilidades de escolha de misturadores de sólidos, a contribuição experimental da homogeneidade e os índices de misturas. Concluíram eles, abordando os diferentes pontos que relatam a complexidade desse processo, conforme é descrito a seguir: a) A nomenclatura criada por muitos autores para refletir a natureza da mistura tem se tornado mais e mais complexa. Em consequência disso, os autores diagnosticaram um excesso de diferentes definições resultando em uma confusa linguagem. b) Idênticos problemas ocorrem com índices de mistura, onde cada autor dá sua própria definição. Para amenizar estas dificuldades de linguagem técnica, sugestões de padronizações são bem vindas. c) Muitos tipos de desenvolvimento de misturadores de sólidos são devido à diversidade de produtos e seus usos. Isto mostra que não existe um critério geral para selecionar um misturador como função da natureza dos ingredientes. d) As presentes observações nestes exames claramente mostram que novos estudos práticos são necessários.

Atendendo à tendência atual de aumentar a eficiência dos processos industriais, nos países desenvolvidos têm surgido importantes trabalhos nessa área. Rielly et al. (1994) trabalhando com sistemas de misturas na produção de alimentos voltados para a agricultura, descrevem o processo de mistura. Segundo estes autores, a mistura pode ser assim descrita: Suponha que a mistura é dividida dentre um número de amostras ou subamostras. Se a mistura é homogênea, então a composição em cada sub-volume será exatamente igual. Tendo como referência uma

imagem onde aparecem quadrados pretos e brancos perfeitamente distribuídos no quadrado maior, tem-se uma mistura homogênea contendo 50% de partículas brancas. Empiricamente, os autores dividiram a mistura dentro de sub-volumes, cada um contendo 16 partículas e claramente elas são em igual número de brancas em cada amostra. A variação provavelmente produzindo a ordem estrutural é extremamente pequena; em geral, o melhor que uma mistura pode realizar é distribuir as partículas brancas variavelmente no espaço. Agora, tendo como referência uma outra imagem, cada sub-volume de 16 partículas contém um diferente número de partículas brancas, embora na média são 8 brancas em cada amostra. Examinando-se somente uma única amostra deste segundo caso, pode-se sugerir que o material não esteja completamente misturado ainda; entretanto, a distribuição variável das partículas não estará resultando em alguma incorreção na qualidade da mistura. Mistura completa pode ser definida como o estado onde todas as amostras são fundidas para conter os componentes em igual proporção como no total da mistura. Nestas bases, a mistura na primeira imagem está completamente executada, contudo, isto pode ser improvável que ocorra na prática. Em contraste, a mistura mostrada na segunda imagem não contém 8 partículas brancas em todas amostras e ainda as partículas estão casualmente distribuídas. Assim, concluem os autores que definições estatísticas dentro de misturas reais que assemelham a uma simples definição de mistura completa, são de pouco uso prático.

3. 1. 8. Tipos de misturadores

A escolha do tipo de misturador mais adequado não é prática comum entre os usuários, sendo estes técnicos ou não. Esta informação é corroborada por Mc Ellhiney (1982), que afirma não serem os misturadores verticais eficientes para misturar ingredientes, embora, sejam os mais empregados, possivelmente pela desinformação existente no meio produtivo de rações.

A eficiência da mistura em misturadores contínuos foi avaliada por Lehtola & Kuoppamäki (1982). Um método de radiotraçador foi usado para testar as características da mistura em misturadores industriais contínuos. Como resultados, obtiveram que para o desenho de misturador este método mostra dados quantitativos de propriedades de homogeneização que podem facilitar o desenvolvimento da construção de misturadores. Para os usuários de misturadores, este método possibilita realizar uma análise de um novo misturador e para determinar a classe de parâmetros de valores onde a performance do misturador é razoável ou ótimo, quando acoplados.

Lopes et al. (1984) analisaram a composição química da ração em quatro locais diferentes do misturador vertical: em cima, na boca de abastecimento e na boca de descarga, no início e no final da descarga, observando as seguintes características: não houve diferenças estatísticas significativas ($P > 0.05$) quanto à proteína bruta, energia bruta, cálcio, sódio, magnésio, ferro e zinco em amostras retiradas nas quatro posições; entretanto, houve diferença estatística significativa ($P < 0.05$)

quanto à fibra bruta, matéria mineral, fósforo, potássio e cobre. Constataram, ainda, que o teor de fibra tendeu a ser bem maior na parte superior do misturador do que na boca de abastecimento. Isto pode ser atribuído à pequena densidade da fibra em relação aos outros nutrientes, enquanto os minerais apresentaram tendência a concentrar-se na parte inferior do misturador, principalmente, os mais pesados como cobre, ferro, zinco e manganês. Fazendo parte da conclusão desse trabalho, esses autores citam que o misturador vertical foi ineficiente na homogeneização, uma vez que a sua composição química apresentou diferenças, quando se analisaram proteína bruta, matéria mineral, fósforo, potássio, manganês e cobre nas amostras retiradas nos quatro diferentes locais do aparelho. Por escolherem misturador do tipo vertical sem critério técnico, muito se perde em qualidade das rações e em energia no seu processamento.

Segundo Mc Ellhiney (1985) a chave para preparar boas misturas é a seleção de um misturador que tenha performance constantemente boa com cada tipo de mistura. O misturador poderá ser bastante rugoso para trabalhar melhor a variedade de densidade de produtos que serão misturados, e a capacidade deste deve ser cuidadosamente considerada para ajustar melhor o tamanho da carga. O misturador deve estar bem localizado para facilitar o trabalho de carga e descarga, bem como a visualização do material que está sendo processado.

Trabalhando com misturadores, Fan & Chen (1990) analisaram as características básicas de treze tipos de misturadores, donde destacam-se os quatro tipos mais usados na agroindústria. O misturadores dos tipos vertical e horizontal têm

como principal mecanismo de ação a convecção e apresentam alta possibilidade de segregação de ingredientes; os misturadores dos tipos “V” e “Y”, têm como mecanismo principal de ação a difusão e apresentam baixa possibilidade de segregação de ingredientes da mistura.

Analisando as características dos tipos de misturadores mais comuns existentes no mercado, Poux et al. (1991) recomenda os tipos “Y” e “V” para misturar materiais secos em geral com precauções para materiais com tendência à aglomeração; já os misturadores verticais e horizontais com mecanismo de rosca sem fim, os autores recomendam para materiais secos ou pastas, resguardando-se os problemas de segregação que podem ocorrer na lateral do aparelho. Assim, as indústrias têm adotado os misturadores do tipo “Y” como forma de obter uma mistura mais homogênea, porém, estes têm o inconveniente de não se adaptarem tão eficientemente na linha de produção quanto os do tipo vertical ou horizontal.

Misturadores para processar alimentos e normalmente usados na indústria de rações animal foram revistos e classificados por Niranjan et al. (1994) dentro de três categorias de acordo com os materiais a serem misturados. Esse trabalho compreendeu análises de misturadores que funcionam como dispersantes e diluentes em líquidos, misturadores de material particulados, e misturadores de sólidos e líquidos para formar pastas. Problemas potenciais associados com misturas de certos materiais, como sucção de partículas e materiais que podem tender à segregação ou aglomeração, foram discutidos conjuntamente com tipos de misturadores que foram

classificados pelas suas aptidões. Dentre as conclusões dos autores, e que são de interesse imediato nesta tese, destacam-se a observações de que aparelhos para a mistura de materiais particulados requerem cuidadoso desenho, e que os principais problemas nesses casos são segregação e aglomeração.

3. 2. FRACTAIS

3. 2. 1. Grandezas físicas, dimensões e suas relações

Segundo Webster (1979), o conceito genérico de densidade pode ser aplicado para outras formas além de volume propriamente dito. Assim, num sentido amplo, em termos dimensionais, densidade poderia relacionar-se com área e comprimento além de volume.

O termo densidade foi, então, revisto para um entendimento amplo do seu significado. A Física tradicional define como grandezas físicas o comprimento, a área, o volume e a massa, atribuindo-lhes, respectivamente, L^1 , L^2 , L^3 e M como suas dimensões (Martins, 1979 e Streeter & Wylie, 1980) Entretanto, não define densidade em área (ex. densidade de corrente - A/m^2) e em comprimento (ex. número de pontos sobre uma linha - n° pontos/cm), embora sejam usadas em muitas áreas aplicadas como medidas intensivas.

É importante notar neste ponto que Mandelbrot (1982), no seu livro que é base para a compreensão dos fractais, apresenta-os com as seguintes características fundamentais: autossimilaridade, mesma dimensão em qualquer escala e lacunaridade, sendo que esta última corresponde às irregularidades nas formas. Quanto à densidade genérica num mesmo material fractal, o mesmo autor esclarece que esta decresce com a diminuição da massa, porém, mantendo-se o volume inicial fixo. Assim, essas considerações vêm complementar, de modo prático, as considerações feitas por Feder (1988) sobre esse assunto, quando relaciona inversamente densidade genérica e volume, porém, em materiais diferentes com volumes variáveis.

Em data mais recente, (Halliday et al., 1994), massa é apresentada pela Física como uma grandeza escalar, sendo uma das propriedades intrínsecas de um corpo e podendo estar relacionada com volume.

O trabalho proposto por Spadotto & Guerrini (1996) facilita a didática envolvida nessas definições. Nesse caso, admite-se a existência de grandezas dimensionais denominadas de aparentes, para diferenciar das já estabelecidas pela Física tradicional. Assim, uma aplicação dessa nova terminologia levaria à uma massa aparente sobre um volume aparente originando uma densidade aparente.

Transformar em tecnologia as descobertas científicas, corresponde ao objetivo principal que deveria ser buscado pelos pesquisadores para atender as necessidades da sociedade. Spadotto & Guerrini (1996) contribuíram com a

divulgação de aplicações de fractais, quando definiram unidade fractal (UF) e matriz fractal (MF) e uma fórmula genérica para determinar a dimensão fractal. Nesse trabalho, os autores enfatizaram que a dimensão fractal pode ser determinada pela fórmula $D = MF / UF$, ou seja, uma relação do todo com a parte de um sistema fractal.

Posteriormente, Spadotto et al., (1996b) definiram que a fórmula prática para a determinação da dimensão fractal da estrutura de solos e de outros materiais porosos é $D = \log V_2 / \log \sqrt[3]{M}$, onde V_2 é o volume compactado e M é a massa correspondente a este volume. Os resultados obtidos para dimensão fractal nesse trabalho e Spadotto et al., (1997a) confirmaram a aplicabilidade dessa fórmula, cabendo, entretanto, ser aperfeiçoado o método, que permitiria determinar a dimensão fractal em ingredientes de rações.

Esta constatação também foi feita por Spadotto et al., (1997b) aplicando a fórmula $D = \log V_2 / \log \sqrt[3]{M}$, acrescida de uma análise em tipos de solos diferentes encontrando uma relação inversa não linear entre densidade do solo e dimensão fractal. Portanto, existem duas situações bem distintas para analisar a relação existente entre dimensão fractal e densidade aparente: a) para materiais diferentes (dimensões fractais diferentes); b) para um mesmo material (mesma dimensão fractal).

3. 2. 2. Fractais: origem e modelos clássicos

Desde 1975, data mais aceita pelos pesquisadores, o mundo científico tomou conta da Teoria do Caos e dos Fractais. Hoje, 20 anos após, esta teoria é tida como um importante ramo da Ciência. Mandelbrot (1982) definiu mais claramente o que outros autores já tinham observado, ou seja, a geometria fractal da Natureza.

Além do trabalho pioneiro de Mandelbrot citado acima, autores como Boccara & Daoud (1985), Feder (1988) e Peitgen (1988), dentre outros, evidenciaram as características fundamentais dos fractais: auto-similaridade, mesma dimensão fracionada em qualquer escala, complexidade gerada por processo iterativo e lacunaridade ou irregularidade na forma. Justamente em função dessas características, e mesmo em épocas anteriores ao surgimento do termo fractal, outros pesquisadores desenvolveram alguns fractais que se tornaram clássicos e referências para novos estudos a partir de Mandelbrot. Estes fractais exatos receberam os nomes dos seus criadores, sendo os seguintes: Poeira de Cantor, Curva de Kock, Triângulo de Sierpinsky, Estrela de Davi, Fractal de Duerer, Carpete de Sierpinsky, Esponja de Menger. De uma forma que será posteriormente explicado, esses fractais apresentam as seguintes dimensões fractais, respectivamente: 0,63, 1,26, 1,58, 1,77, 1,84, 1,89, 2,73. Deve ser observado, também, que os valores encontrados não são inteiros como 0, 1, 2 e 3, sendo estes últimos, sim, características da Geometria Euclidiana que apresenta dimensões inteiras. Todo esse estudo tem mostrado que os valores de

dimensão podem ser fracionários, em contraste com as dimensões Euclidianas (Feder, 1988; Avnir, 1989; Bird, 1993).

3. 2. 3. Fractais e materiais porosos

Pelas suas inerentes características, a dimensão fractal tem sido usada para examinar a heterogeneidade de diferentes estruturas naturais. Assim, por exemplo, as irregularidades de diversos materiais semelhantes ao arenito ou partículas minerais foram estudadas, na prática, por Katz & Thompson (1985), que afirmaram ser este método próprio para este tipo de análise.

Já num estudo teórico de fragmentação, Turcotte (1986) desenvolveu um modelo que reproduz a observada relação entre diâmetro e número de partículas, usando a equação $N \sim R^{-D}$, onde N é o número de partículas, R é o raio destas e D é a dimensão fractal dessa distribuição, entretanto, não encontrando uma relação específica com a massa.

Essa falta de alguma relação entre D e a massa da estrutura original é explicada na análise de Turcotte (1986), a qual se inicia com um cubo Euclidiano e reproduz uma fragmentação obedecendo a equação acima. Esse autor determinou com suas análises o número-tamanho das partículas, e que D , a dimensão fractal, é uma medida da dimensão limite do conjunto da fragmentação, a qual é medida como o total de partículas exterior, portanto, com características independentes da sua massa.

Para Sander (1986), uma estrutura fractal não pode ser compreendida por escala semelhante de um círculo ou comprimento de um cubo que servem para definir estas formas. Antes, continua esse autor, esta nova teoria faz-se importante na macro resolução nos volumes, áreas ou comprimentos em escalas particulares. Também, no interior dos limites dos objetos reais, a definição de um fractal fornece, sobretudo, requisitos sobre a massa do material no seu interior relacionada com o raio R e concordando com a equação $M(R) = k.R^D$, onde k é uma constante e D é a dimensão fractal. Nos casos limites, D se identifica com as medidas Euclidianas de dimensão, salientando-se, porém, que o material de um fractal é agrupado, auto-similar e pode assumir valores fracionários. Assim, D mede o espaço de preenchimento de um meio, propriedades de distribuição da massa ou das partículas, desigualdades de uma superfície ou as irregularidades de uma linha. Estes processos físicos de irregularidades, com as características citadas, identificam um fractal.

Além dessas qualidades, os métodos para a determinação de D são também empregados para estimar a distribuição e tamanho dos poros (Murphy, 1986) e condutividade dos poros (Scott et al., 1988). Essas técnicas foram desenvolvidas em tentativas não concluídas para medir a heterogeneidade da estrutura do solo uniforme e, através destas a dimensão fractal foi reconhecida como uma importante característica deste.

A discussão sobre ser ou não um agregado fractal, como visto anteriormente, passa por várias fases e trabalhos. Feder (1988) acrescenta uma importante

informação. “É preciso enfatizar que o fato de um agregado ser poroso ou desorganizado não significa ser ele, necessariamente, fractal. Um agregado fractal tem a propriedade que a sua densidade decresce com o aumento do seu volume.” Com isso, o autor sugere uma provável independência entre massa e volume num fractal, pois a densidade é variável.

A inclusão da massa como elemento que compõe uma determinação de dimensão fractal veio mais tarde. Tyler & Wheatcraft (1989), discorreram sobre a relevância da dimensão limite para se descrever os caminhos dos poros e a retenção de água no solo, mas interpretam D na equação $N \sim R^{-D}$ como a dimensão da massa fractal. Contudo, nessas medidas, o valor de D excedeu a 3, que traz complicações para a sua interpretação.

Os fractais também têm sido usados para examinar a heterogeneidade de diferentes estruturas naturais semelhantes a superfícies quebradas. Kaye (1989) e Kare (1989) se referem a esta análise como a fragmentação da dimensão fractal para o conjunto de partículas, antes que atinja o limite do fragmento individual - sendo isto interpretado como mantendo-se as unidades características de um sistema fractal. Neste ponto, deve-se observar a proposta da existência de uma fragmentação individual, a partir da qual, um outro fractal poderia se formar.

Até essa data (1989), as pesquisas esbarram na caracterização de uma quantificação que a dimensão fractal poderia possibilitar. Para três diferentes tipos de solos, Ahl & Niermeyer (1989) obtiveram valores de D variando entre 2,1 a 2,8 e

sugerem que suas medidas quantificaram o espaço de enchimento próprio da estrutura do solo. Contudo, a comparação feita por Toledo et al. (1990), utilizando o microscópio eletrônico de Katz & Thompson (1985), obtiveram dimensões para a parede porosa do arenito na variação de 2,57 a 2,87, e sugerem que seus valores de D ainda são subestimados.

Segundo Perfect & Kay (1991), os recentes avanços na teoria fractal podem ser aplicados na caracterização de estruturas do solo. Os mesmos autores citam que nesse estudo, agregados de solo foram moldados para assumirem a forma aproximada de cubos com densidade trabalhada para ser constante. Nestas condições a dimensão fractal D foi determinada obtendo-se a mensuração da fragmentação sendo que os valores de D aumentaram com o aumento da fragmentação - sendo isto explicável pelo aumento das irregularidades estruturais. O valor de D foi estimado relacionando tamanho e frequência da distribuição das partículas na escala logarítmica. Obteve-se valores de 2,51 a 3,52 para a dimensão fractal, e concluíram que a teoria fractal oferece potencial para entendimento do agregado, bem como, caracterizando o grau de fragmentação.

No aperfeiçoamento das técnicas para a determinação da dimensão fractal de substâncias sólidas, a massa parece ser um fator que aumenta a confiabilidade no método, e Esbensen Jr. (1991) relaciona o conceito de densidade ($d = M/V$) para o cálculo da dimensão fractal. No seu trabalho, o autor comprime a massa de pão modelando-a na forma de bolas, relacionando os valores de massa com volume após

a compressão, na escala logarítmica. Obteve, então, valores para D em torno de 2,08, e compara com os valores de D do papel amassado (Ko & Bean, 1991) que foi de 2,50, afirmando serem coerentes os seus resultados quando comparados. Este resultado poderia sugerir contrariedade, pois esperava-se uma dimensão fractal maior para o pão que reduziu mais o seu volume, o que é contrargumentado pelo autor que esclarece ser o pão feito de fibras unidimensionais para preencher um espaço tridimensional, enquanto que o papel é feito de fibras bidimensionais para preencher um espaço tridimensional. Para o papel, os valores obtidos para D variaram entre 2,30 a 2,79.

Já Rieu & Sposito (1991a), determinando a resultante da relação entre a densidade e a massa de agregados de solos, encontraram valores de $D=2,88$ para areia + argila, $D=2,91$ para lama de areia e $D=2,95$ para a argila. Os autores sugerem que agregados de solos podem ser objetos fractais e que os espaços dos poros em solos plásticos podem exibir características de estrutura de um fractal fragmentado médio, porém, nunca ultrapassando o valor 3.

Schroeder (1991) generaliza para o cálculo da dimensão fractal de uma massa o uso da equação $M \sim R^D$, onde M é a massa, R é o raio e D a dimensão fractal, portanto, relacionando massa com volume. Os valores de D concordaram com Esbensen Jr. (1991). Estabeleceu, então, uma relação logarítmica da massa e com o diâmetro para obter a dimensão fractal, tendo como base a fórmula genérica $M \sim d^D$, onde M é a massa e d é o diâmetro, em similaridade com Ko & Bean (1991).

Rieu & Sposito (1991b) forneceram uma distinção entre a dimensão fractal deduzida para análise de tamanho de agregado e a dimensão fractal deduzida para uma medida da relação entre a grandeza da densidade e o tamanho do agregado. Portanto, além de variáveis diferentes de análise, estes dois autores apresentam métodos distintos para a mesma finalidade.

Nessa mesma linha, segundo Young et al. (1991), a estrutura do solo é cavernosa e é nestes espaços que todos os processos ocorrem. A organização espacial dessas cavernas pode ter significativa variação em escalas muito pequenas de tempo e distâncias, através da distribuição espacial natural das partículas e poros. Esta heterogeneidade da estrutura do solo controla o seu próprio comportamento.

Young & Crawford (1991) examinaram a teoria dos fractais em relação à estrutura do solo já com aplicações em práticas agrícolas. Em solos manejados com diferentes sistemas de culturas, mostraram que D variou entre 2,75 a 2,93 e também recomendam o uso da dimensão fractal para quantificar a heterogeneidade desses, concordando com a definição original de Mandelbrot. Os mesmos autores esclarecem que a comparação de valores de D determina, sobretudo, a validade do método para análise dos poros na parede rugosa.

Isto é verdadeiro, comenta Young et al. (1991), somente se, como no exemplo da Esponja de Menger, grandes poros não drenarem através de pequenos poros. Contudo, no realístico quadro de um agregado, grandes poros típicos são conectados

ao exterior do agregado formando uma rede de pequenos canais. No limite exterior do agregado, porém, somente algumas frações, os grandes poros, são preenchidos.

Neste sentido, Bartolli et al. (1991) resume o seu trabalho do seguinte modo: “A estrutura de solos foi estudada usando a concepção de fractais, relacionando a textura do solo e propriedades dos agregados, como absorção de carga mecânica e estabilidade dos mesmos. A dimensão fractal para a massa e para a porosidade foram determinadas, usando várias seções de solo. Como uma conclusão preliminar, a dimensão fractal parece ser potencialmente uma útil ferramenta para compreender o fundamental mecanismo de desagregação ou da criação de estruturas porosas.”

Perfect et al. (1992) se utilizaram da dimensão fractal para caracterizar a distribuição dos tamanhos das partículas de solo. Assim, a dimensão fractal D teve como base para sua determinação a relação entre tamanho e número de partículas e, em várias amostras de solos, foi também relacionado massa-tamanho. A distribuição do número-tamanho pôde ser produzida a partir da distribuição massa-tamanho, assumindo aspecto de densidade. A dimensão fractal variou entre 0,67 a 3,92 para D relacionado com o número de partículas e de 0,79 a 4,06 para D relacionado com a massa.

Houve a retratação desses resultados quando Tyler & Wheatcraft (1992) sugerem que, no trabalho anterior, D foi superestimado como um resultado de erros na curva de ajuste, pois não é admitido valores maiores que 3.

Como já vinha sendo estimulado em pesquisas anteriores, no que se refere a solos ou a meios porosos com partículas semelhantes, a relação massa-volume indica o melhor caminho para a determinação da dimensão fractal.

Na mesma época, Scott & Stephen (1992) analisaram a hipotética distribuição de massa para a determinação da dimensão fractal, relacionando a porcentagem de massa e o raio das partículas. Os autores obtiveram valores de D entre 2,40 a 2,96, sendo que estes aumentaram à medida em que diminuía o raio e aumentava a massa. Assim, estabeleceram uma relação entre as porcentagens de argila com a areia, obtendo-se a seqüência (argila + areia): 80+10, $D=2,96$; 40+40, $D=2,88$; 20+50, $D=2,76$; 10+70, $D=2,66$; 0+90, $D=2,41$. No mesmo trabalho, tendo como base o número de partículas ou a massa, no primeiro caso D variou entre 2,682 a 3,499 e valendo-se da massa variou entre 2,006 a 2,839. Os autores também concluem que a determinação de D baseado na massa é menos variável e, por isso, tende a ser mais indicado para trabalhos de campo, cujos valores estiveram dispostos entre zero e 3.

Crawford et al. (1993) demonstraram que a relação entre o tamanho e número de partículas não necessariamente implica que a estrutura do sólido matriz seja fractal. Portanto, as características fundamentais dos fractais devem ser consideradas em qualquer caso.

Evoluindo na sua análise da dimensão fractal através de formas geométricas como a linha, o quadrado, o círculo, o cubo e a esfera, Bird (1993) relaciona as

mesmas com D , esclarecendo que, usa-se sempre a equação $L \sim M^{1/D}$, onde D é a dimensão fractal, L é o comprimento e M a massa.

Crawford (1994) mostra que D na equação $L \sim M^{1/D}$ não pode ser interpretado como a dimensão da massa fractal isolada, mas, somente como a dimensão limite em algumas circunstâncias. Também, levanta similar crítica com relação a trabalhos anteriores onde os valores de D foram determinados para número-tamanho de partículas e, de acordo com a equação acima, excederam 3. Assim, afirmou que a dimensão fractal é, ainda, interpretada como uma dimensão fractal da massa e relaciona esta à rugosidade da superfície.

Pesquisas com infiltração de água no solo podem mostrar as características fractais dos poros e do próprio processo de difusão da água no solo (Guerrini & Swartzendruber, 1994). Por outro lado, Guerrini et al. (1996) mostraram que solos com partículas com diâmetros menores, apresentam características hídricas distintas dos solos com partículas maiores. E trabalhando com infiltração vertical, Guerrini et al. (1997) evidenciam em experimentos iniciais que em Terra Roxa Estruturada a velocidade de infiltração é menor do que em Latossolo Vermelho Amarelo, sugerindo que esta característica esteja relacionada com a dimensão fractal.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

4. 1. 1. Solos

Foi com solos, dentre os materiais porosos, que se desenvolveram a maior parte dos estudos com fractais, obtendo-se, mesmo, resultados conclusivos. Por esta razão, foi feita a opção de ajustar-se o método proposto trabalhando-se com este tipo de material poroso.

Tomou-se, então, 3 tipos diferentes de solos da região de Botucatu, sendo estes os seguintes: Terra Roxa Estruturada, Latossolo Vermelho Amarelo e Areia Quartzosa.

4. 1. 2. Ingredientes de rações animal

Os objetos finais de análise desta tese foram os ingredientes minerais normalmente empregados no preparo de misturas utilizadas na fabricação de rações, quer de um sal mineral ou como componentes de rações balanceadas. Trabalhou-se

com sulfato ferroso, óxido de zinco, óxido de magnésio, fosfato bicálcico, enxofre elementar e farinha de ossos autoclavada fina (este último não é mineral, mas tem função nutricional idênticas aos minerais).

4. 1. 3. Misturador de rações

Para executar a mistura dos ingredientes de rações foi construído um misturador do tipo “Y” de PVC, medindo 20 cm no seu comprimento maior e acionado manualmente, de modo que foi possível contar com exatidão o número de voltas de cada batida. Este tipo de misturador é recomendado como tendo alta eficiência de mistura, praticamente nenhuma influência na densidade dos ingredientes, embora tenha um elevado grau de dificuldade na sua carga e descarga, fator este desprezível para o trabalho desenvolvido.

4. 1. 4. Analisador de composição química mineral

Para realizar as análises químicas dos minerais, foi utilizado um Espectrofotômetro de Absorção Atômica da marca Perkin Elmer, que é reconhecido como um aparelho preciso e é amplamente utilizado pelos laboratórios que trabalham nesta área, tanto na pesquisa como na indústria.

4. 2. Métodos

4. 2.1. Desenvolvimento da Fórmula Spadotto

A maioria dos conceitos abaixo descritos são novos ou pouco conhecidos; portanto, para a aplicação neste trabalho deverão ser incorporados nesta metodologia. A sequência que se inicia é autoexplicativa, sendo reservada para a discussão o detalhamento da mesma. O termo “aparente” é empregado para se diferenciar das definições restritas à Física. As unidades de medidas para este trabalho, conforme proposta na revisão de literatura, correspondem a quantidades em termos genéricos. As convenções a serem utilizadas são as seguintes:

- a) Dimensão = todo/parte
- b) Dimensão = MF/UF
- c) $UF = \sqrt[b]{MF}$ (raiz índice b)
- d) “ $\sqrt[b]{}$ ” = Redutor dimensional, que reduz qualquer dimensão a dimensão “1”. Para comprimentos, $b=1$; para áreas, $b=2$ e para volumes, $b=3$.
- e) Índice “b” é a dimensão euclidiana inteira (1, 2 ou 3) da semente inicial do fractal, inserido como potência $((M^{1/b})$ para normalizar a escala ao tornar a variação linear (M) matematicamente compatível com o espaço geométrico dessa semente (linha, plano ou volume).
- f) log = Função logaritmo que funciona como um ajustador, transformando um sistema não-linear em linear, desde que haja uma curva de potência.
- g) $D = \log(MF) / \log(\sqrt[b]{MF})$

- h) $MF=V_1$ = volume aparente na dimensão inteira, sendo empregado para designar esta dimensão.
- i) $MF=V_2$ = volume aparente na dimensão fractal, sendo empregado para determinar a dimensão fractal (uma quantidade qualquer no objeto fractal).
- j) M = massa aparente (uma quantidade qualquer no objeto gerador)
- k) $d_2 = M/V_2$ = Densidade fractal aparente
- l) $UF = \sqrt[b]{V_1} = \sqrt[b]{M} = \sqrt[b]{(d_2 \times V_2)}$
- m) D_i = dimensão inteira, D = dimensão fractal
- n) $D_i = \log(V_1) / \log(\sqrt[b]{V_1}) = \log(V_1) / \log(\sqrt[b]{M}) = \log(V_1) / \log(\sqrt[b]{(d_2 \times V_2)})$
- o) $D = \log(V_2) / \log(\sqrt[b]{V_1}) = \log(V_2) / \log(\sqrt[b]{M}) = \log(V_2) / \log(\sqrt[b]{(d_2 \times V_2)})$
- p) $D = \log(V_1 \text{ ou } (V_2) / \log(\sqrt[b]{(d_2 \times V_2)})$

Fórmula Spadotto para determinar a dimensão fractal: $D = \log(V_2) / \log(M^{(1/b)})$, também expressa como $D = \log(V_2) / \log(M^{(1/b)})$ ou $D = \log(V_2) / \log(\sqrt[b]{M})$

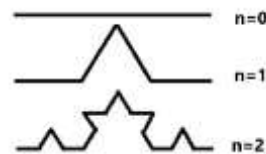
Esta fórmula permite variações como as apresentadas acima.

4. 2. 2. Testando a Fórmula Spadotto

Os fractais abaixo mencionados são modelos clássicos e amplamente divulgados nesta área. Com a finalidade de ajustar a metodologia, pode-se aplicar a fórmula *Spadotto* para determinar a dimensão fractal desses modelos, esclarecendo que esta mesma fórmula pode ser empregada para determinar a dimensão euclidiana, conforme é demonstrado a seguir. Para facilitar a nomenclatura, adotou-se D_i para nomear a dimensão inteira e D para a fractal.

- **Curva de Kock:** Uma linha, de dimensão 1, é dobrada de modo que cada uma das suas partes seja autossimilar, portanto, a dimensão fractal esperada será entre 1 e 2. Para achar D, entende-se que no primeiro nível de iteração, V_2 é 4, ou seja, a linha foi dobrada em 4 partes auto-similares, e que M ($M = d_2 \cdot V_2$) é 3, ou seja, o número de partes total na dimensão inteira “1”. O valor encontrado é maior que 1 porque a dimensão de uma linha dobrada é maior que a de uma linha reta. A **Figura 1** (abaixo) mostra a Curva de Kock. O primeiro nível de iteração corresponde à reta dobrada em 4 partes.

Figura 1: Curva de Kock



Antes de dobrar a linha:

$$D_i = \log(V_1) / \log(\sqrt[3]{d_2 \times V_2})$$

$$D_i = \log 3 / \log \sqrt[3]{0,75 \times 4} \therefore$$

$$D_i = \log 3 / \log 3 \therefore D_i = 1,00$$

Após dobrar-se a linha:

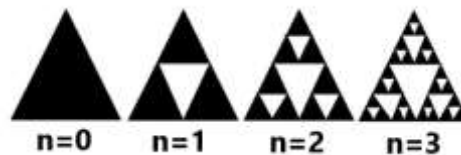
$$D = \log V_2 / \log \sqrt[3]{d_2 \times V_2}$$

$$D = \log 4 / \log \sqrt[3]{0,75 \times 4} \therefore$$

$$D = \log 4 / \log 3 \therefore D \approx 1,2619 \text{ (mesmo valor da dimensão de Hausdorff).}$$

- **Triângulo de Sierpinsky:** Um triângulo equilátero é dividido em 4 triângulos equiláteros, sendo os vértices do triângulo interno os pontos médios dos lados do triângulo gerador ou maior; do triângulo dividido retira-se o triângulo do meio. Na primeira iteração, V_2 é 3 ou o número de triângulos restantes na maior dimensão inteira do sistema, e M ($M = d_2.V_2$) é 4, ou o número de triângulos na dimensão inteira “2”. A Figura 2 (abaixo) corresponde ao Triângulo de Sierpinsky. O primeiro nível de iteração é o primeiro triângulo da sequência da esquerda para a direita.

Figura 2: Triângulo de Sierpinsky



No triângulo equilátero gerador:

$$D_i = \log V_1 / \log \sqrt[3]{d_2 \times V_2}$$

$$D_i = \log 4 / \log \sqrt[3]{1,333 \times 3} \therefore$$

$$D_i = \log 4 / \log \sqrt[3]{4} \therefore D_i = 2,00$$

Após a retirada do triângulo central:

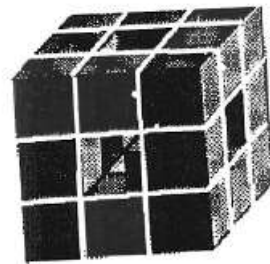
$$D = \log V_2 / \log \sqrt[3]{d_2 \times V_2}$$

$$D = \log 3 / \log \sqrt[3]{1,333 \times 3} \therefore$$

$$D = \log 3 / \log 2 \therefore D \approx 1,5850 \text{ (mesmo valor da dimensão de Hausdorff).}$$

- **Esponja de Menger:** De um cubo grande formado por 27 pequenos cubos são retirados 7 destes últimos, sendo um do centro do cubo maior e os outros seis do centro de cada um dos lados. Portanto, V_2 é 20 ou os vinte pequenos cubos restantes na maior dimensão inteira do sistema, e M ($M = d_2 \times V_2$) corresponde aos 27 cubos existentes na dimensão inteira “3”. A Figura 3 (abaixo) corresponde a Esponja de Menger no primeiro nível de iteração.

Figura 3: Esponja de Menger



Para o gerador, tem-se:

$$D_i = \log V_1 / \log \sqrt[b]{d_2 \times V_2}$$

$$D_i = \log 27 / \log \sqrt[3]{1,35 \times 20} \therefore$$

$$D_i = \log 27 / \log \sqrt[3]{27} \therefore D_i = 3,00$$

Após a retirada dos 7 pequenos cubos:

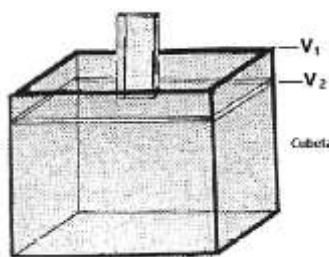
$$D = \log V_2 / \log \sqrt[b]{d_2 \times V_2}$$

$$D = \log 20 / \log \sqrt[3]{1,35 \times 20} \therefore$$

$$D = \log 20 / \log 3 \therefore D \approx 2,7268 \text{ (mesmo valor da dimensão de Hausdorff).}$$

4. 2. 3. Desenvolvendo o método para materiais porosos

Com a finalidade de determinar a dimensão fractal em materiais porosos, como por exemplo os solos e os ingredientes de rações, foi desenvolvido este método prático através de cubetas, designado como *MC-D* (Spadotto et al., 1996b).



Este método prático para a determinação da dimensão fractal foi desenvolvido nos laboratórios de Departamento de Física e Biofísica do Instituto de Biociências da UNESP, Campus de Botucatu. Primeiramente, trabalhou-se com solos, comparando-se os resultados com a literatura para o ajustamento do método e, posteriormente, aplicou-se o mesmo sistema prático para os ingredientes minerais normalmente usados na formulação de rações.

Inicialmente, foram construídas cubetas de acrílico transparente com espessura da parede de 0,3 cm e medidas internas de 7 cm de altura por 2,5 cm de cada lado. Para tornar o método o mais prático possível com menores variações na repetibilidade de todo o processo, foram realizados testes empíricos que levaram a

reduzir-se a altura das cubetas para 2 cm. Para a compactação do material no seu interior, foram construídos socadores do mesmo material e cujas medidas se encaixam sem muita folga dentro das cubetas, sendo que uma haste permite movimentá-lo dentro destas sem restrições. Trabalhou-se com nove materiais diferentes, sendo três tipos de solos e seis tipos de ingredientes minerais, e para cada um destes foram feitas dez repetições. Os materiais utilizados estavam secos, em equilíbrio com a umidade relativa do ar e à temperatura ambiente. O preparo das amostras obedeceu à seguinte sequência: peneiramento em malha de 2 mm, colocação dos materiais nas cubetas, vibração com a batida do dedo indicador por 5 vezes em cada um dos quatro lados, compressão do material com o socador mantendo as cubetas niveladas numa superfície plana. Facilmente observa-se que a compactação foi completada sem a necessidade de grandes esforços. Após a compactação, pesou-se a cubeta com a amostra, subtraindo-se a tara para obter a massa (M) correspondente da amostra. Com uma régua graduada em milímetros, mediu-se a altura do material dentro das cubetas para se obter o volume (V_2). Chama-se, então, V_2 o volume após a compactação e M a massa de cada amostra. Para a determinação da dimensão fractal, aplicou-se a fórmula acima desenvolvida: $D = \log(V_2) / \log(\sqrt[3]{M})$ ou $(D = \log(V_2) / \log(M^{1/3}))$.

4. 2. 4. Avaliação da eficiência da mistura

Caracterizados os seis minerais ingredientes de rações pelas suas respectivas dimensões fractais, três destes foram misturados no aparelho descrito anteriormente. Primeiramente, escolheu-se o sulfato ferroso como ingrediente básico ou aquele que forneceria o elemento químico (Fe) a ser determinado na análise por espectrofotométrica de absorção atômica e que seria o marcador físico-químico da qualidade da mistura. O elemento químico ferro do sulfato ferroso apresenta a vantagem de ser solúvel em água e é determinado facilmente pelo método acima mencionado. À esta escolha, procedeu-se com outras, que foram as dos outros dois ingredientes que seriam misturados com o sulfato ferroso, obedecendo aos seguintes critérios: que tivessem dimensões fractais distintas entre si; que um deles tivesse dimensão fractal próxima a do sulfato ferroso e o outro, conseqüentemente, distante deste ingrediente; que não apresentassem riscos de possuir o elemento químico ferro na sua composição. Com estes parâmetros, as escolhas recaíram sobre o óxido de zinco e o óxido de magnésio.

Dimensionadas para ocupar sempre no máximo 40% em volume da capacidade máxima do misturador, realizou-se as misturas contando-se 100 voltas após o carregamento, que foi padronizado quanto à ordem de entrada e deposição dos ingredientes. Na primeira fórmula foram misturados 5g de sulfato ferroso com 45g de óxido de zinco, e na segunda fórmula foram misturados 5g de sulfato ferroso com 45g de óxido de magnésio, sendo que dentro de cada fórmula foram feitas 8

repetições. O padrão, ou porcentagem do elemento químico ferro contido no sulfato ferroso, foi determinado pelo mesmo método analítico e com 4 repetições. Para cada batida foram coletadas 2g como amostras, ou seja, 4% da mistura total.

Tanto para as determinações das dimensões fractais como para as misturas dos ingredientes minerais e respectivas coletas de amostras, as medidas foram realizadas com temperaturas variando entre 25°C a 30°C e com a umidade relativa do ar entre 65% a 75%.

4. 2. 5. Análise dos dados

A análise dos dados da presente pesquisa procurou contemplar dois aspectos fundamentais: a eficiência do método prático para a determinação da dimensão fractal em materiais porosos e a influência que a dimensão fractal tem sobre a eficiência no processo de misturas de ingredientes de rações. Os desvios das repetições foram analisados no programa de computadores chamado Microcal Origin 3.5. Para grandes diferenças, fez-se a opção prática por interpretar os resultados de eficiência em percentagem. Para os resultados exatos (dos modelos clássicos), não houve necessidade de análises além da comparação direta.

5. RESULTADOS

5. 1. Ajuste da fórmula proposta

A Quadro 1 mostra os resultados de dimensão inteira (D_i), de dimensão fractal (D) e de densidade aparente (d_2) dos modelos de fractais já consagrados na literatura, obtidos pela fórmula Spadotto. A Quadro 2 mostra as mesmas análises para a Esponja de Menger, modificada em posição de retirada de unidade fractal estrutural.

Quadro 1

Mostra os valores de dimensão fractal (D) e inteira encontrados pela Fórmula Spadotto ($D = \log(V_2) / \log(M^{(1/b)})$), para os modelos clássicos (no nível 1 de iteração)

Modelos de Fractais	$D = \log(V_1) / \log(\sqrt[b]{d_{2x} V_2})$ $D = \log(V_2) / \log(\sqrt[b]{d_{2x} V_2})$	Resultado (Di ou D)	d_2
Poeira de Cantor	$D_i = \log 3 / \log 3$	1,00	1,00
Poeira de Cantor	$D = \log 2 / \log 3$	0,63	1,50
Curva de Kock	$D_i = \log 3 / \log 3$	1,00	1,00
Curva de Kock	$D = \log 4 / \log 3$	1,26	0,75
Triângulo de Sierpinsky	$D_i = \log 4 / \log \sqrt[4]{4}$	2,00	1,00
Triângulo de Sierpinsky	$D = \log 3 / \log \sqrt[4]{4}$	1,58	1,33
Estrela de Davi	$D_i = \log 9 / \log \sqrt[9]{9}$	2,00	1,00
Estrela de Davi	$D = \log 7 / \log \sqrt[9]{9}$	1,77	1,29
Fractal de Duerer	$D_i = \log 7 / \log \sqrt[7]{7}$	2,00	1,00
Fractal de Duerer	$D = \log 6 / \log \sqrt[7]{7}$	1,84	1,17
Carpete de Sierpinsky	$D_i = \log 9 / \log \sqrt[9]{9}$	2,00	1,00
Carpete de Sierpinsky	$D = \log 8 / \log \sqrt[9]{9}$	1,89	1,12
Esponja de Menger	$D_i = \log 27 / \log^3 \sqrt[27]{27}$	3,00	1,00
Esponja de Menger	$D = \log 20 / \log^3 \sqrt[27]{27}$	2,73	1,35

Os valores aqui encontrados são **exatos**, quando comparados com os resultados originais desses modelos.

Neste caso, d_2 não tem unidade por tratar-se de densidade aparente.

Quadro 2**Mostra Valores de D e d_2 para a Esponja de Menger, modificada.**

V_2	$D = \log(V_2) / \log({}^b\sqrt{d_{2x}V_2})$	Resultado (D)	d_2
(16)	$D = \log 16 / \log^3 \sqrt[3]{27}$	2,52	1,69
(18)	$D = \log 18 / \log^3 \sqrt[3]{27}$	2,63	1,50
(20)	$D = \log 20 / \log^3 \sqrt[3]{27}$	2,73	1,35
(26)	$D = \log 26 / \log^3 \sqrt[3]{27}$	2,97	1,04

Os valores aqui encontrados são **exatos**, quando comparados com os resultados originais desses modelos. Neste caso, d_2 não tem unidade por tratar-se de densidade aparente.

5. 2. Ajuste do MC-D

O ajuste desse método foi realizado trabalhando-se com solos, e os resultados médios de 10 repetições são mostrados na Quadro abaixo. Nestes casos, a densidade aparente (d_2) (termo definido para este trabalho, sem unidade e diferindo de densidade global) coincide com a densidade global (g/cm^3), do material compactado.

Quadro 3**Mostra Dimensões fractais (D) e densidades aparentes (d_2) dos solos**

Tipos de Solos	D ($D = \log(V_2) / \log({}^b\sqrt{d_{2x}V_2})$)	d_2
Areia Quartzosa	$2,39 \pm 0,01$	$1,65 \pm 0,01$
Latossolo Vermelho Amarelo	$2,48 \pm 0,01$	$1,55 \pm 0,01$
Terra Roxa Estruturada	$2,72 \pm 0,02$	$1,24 \pm 0,01$

Os desvios são dados pelo erro padrão da média, em 10 repetições. Neste caso, d_2 não tem unidade por tratar-se de densidade aparente.

5. 3. Caracterização dos ingredientes pela dimensão fractal

Os resultados médios de 10 repetições são mostrados na Quadro abaixo. Nestes casos, a densidade aparente coincide com a densidade global (g/cm^3), do material compactado.

Quadro 4

Mostra Dimensões fractais (D) e densidades aparentes (d_2) dos minerais.

Minerais	Dimensão Fractal ($D = \log(V_2) / \log(\sqrt[b]{d_2 \times V_2})$)	d_2
Óxido de Zinco	$2,26 \pm 0,01$	$1,74 \pm 0,01$
Enxofre Elementar	$2,60 \pm 0,03$	$1,31 \pm 0,03$
Óxido de Magnésio	$2,66 \pm 0,01$	$1,25 \pm 0,01$
Sulfato Ferroso	$2,80 \pm 0,01$	$1,14 \pm 0,01$
Farinha de Ossos Autoclavada Fina	$2,94 \pm 0,02$	$1,07 \pm 0,02$
Fosfato Bicálcico	$2,97 \pm 0,04$	$1,03 \pm 0,04$

Os desvios são dados pelo erro padrão da média, em 10 repetições.
Neste caso, d_2 não tem unidade por tratar-se de densidade aparente.

5. 4. Avaliação da eficiência da mistura

A Quadro abaixo mostra a quantidade do elemento químico ferro após o processo de mistura. A mistura homogênea ideal corresponde a 2,56% de ferro.

Quadro 5**Mostra porcentagem de ferro nas misturas, e no sulfato ferroso**

Ingredientes	Fe (%)
Sulfato Ferroso	25,56±0,05
Sulfato Ferroso + Óxido de Zinco	0,58±0,03
Sulfato Ferroso + Óxido de Magnésio	0,03±0,01

Os desvios são dados pelo erro padrão da média, em 8 repetições.

6. DISCUSSÃO

6. 1. Energia e Agricultura

Sem dúvidas, a crise energética prevista há aproximadamente 20 anos atrás confirmou-se no presente. Infelizmente, não foram os trabalhos dessa época passada como Goldemberg (1979) e os levantamentos dos órgãos governamentais como IBEGE (1985) que prepararam o país para a crise dos dias atuais. Também parece claro que o processamento de alimentos, sendo uma parte expressiva dos 16% do consumo total de energia em um país desenvolvido (Cerada & Sanches, 1985) represente motivo suficiente para que se realizem muitas pesquisas com o objetivo de racionalizar o uso de energia nesse setor.

Com base em que cada processo de mistura é um caso particular, e que este experimento representa apenas um desses casos, não se pode estimar com segurança a economia de energia que se faria ao se escolher ingredientes de rações com dimensões fractais que requeiram menos tempo de processamento em mistura. O que pode ser visualizado, é que apenas uma fábrica de porte médio a pequeno produz em torno de 15.000 toneladas de rações por mês, e que uma pequena diminuição no tempo de mistura representará grande economia de energia. Buscar novas formas de

racionalizar energia é não negar fatos históricos ilustrados por trabalhos como Assumpção (1986), Instituto de Economia Agrícola (1989) e Rodriguez (1990) dentre outros, seguindo a palavra de ordem de uso racional de energia.

6. 2. Ingredientes de rações

Neste trabalho caracteriza-se os minerais como ingredientes de rações animal, embora possam haver alguns pontos a serem discutidos nesse sentido. Em definições mundialmente reconhecidas, os minerais fazem parte das classes de alimentos, cabendo dúvidas quanto à sua classificação mais específica. Adotou-se para este trabalho a classificação na qual os minerais são ingredientes de rações amparado na referência (National Research Council, 1970). Assim, não há contradição e nem confusão quanto à nomenclatura dos materiais empregados neste trabalho, mesmo com as especificações adotadas por outros autores como Lioyd et al. 1982) e Andriguetto et al. (1984). Entretanto, apesar da clareza das definições aqui adotadas, não se pode deixar de reconhecer que, quanto ao modo de emprego dos minerais nas rações, estes podem ser como alimentos prontos, como premix ou núcleos de rações.

6. 3. Análises químicas de minerais

Adotou-se aqui a análise por absorção atômica, que é amplamente recomendada para minerais, quer sejam macroelementos ou microelementos, conforme descrito por National Research Council (1970), Lioyd et al. (1982) e

Islabão (1984). O aparelho empregado foi um Espectrofotômetro de Absorção Atômica da marca Perkin Elmer, que já vem sendo empregado há vários anos no Departamento de Solos da UNESP, Câmpus de Botucatu, com reconhecidos resultados positivos. O ingrediente de rações sulfato ferroso foi escolhido como marcador na qualidade da mistura, por ser solúvel em água e por não estar presente o elemento químico Fe na composição dos outros ingredientes que foram testados (Lehninger, 1980), (Feltre, 1991).

6. 4. Processos de misturas alimentares

Corroborando com Axe (1995) de fato, na saudável competição entre as indústrias dessa área, o ponto de estrangulamento é, hoje em dia, o processamento dos alimentos. Isto ocorreu porque a nutrição animal conseguiu compreender muito dos fenômenos de digestibilidade e disponibilidade em meio biológico enquanto que no campo físico da mistura os limites logo esbarraram no caos de uma mistura de ingredientes. O termo caos é aqui empregado com todo o seu rigor de significância, visto ser assim, propositalmente, relacionado com fractais. Portanto, a compreensão dos fractais pode ser a solução para melhorar a eficiência na produção de rações, e de outros produtos similares.

6. 5. Tempo de mistura

Alguns fatores que podem influenciar na qualidade do produto resultado de misturas de sólidos estão sendo estudados há vários anos. O tempo em que um misturador deva ficar funcionando, após o último carregamento, corresponde a um desses fatores e, sem dúvidas, tem influência direta no consumo de energia e na qualidade do alimento processado.

Para utilização na prática industrial muitas observações foram feitas, como as de McEllhiney et al. (1982) que recomenda um tempo mínimo de 15 minutos de mistura após a adição do último ingrediente. Esta recomendação, que é independente do tipo de ingrediente e do modelo de aparelho misturador, ainda é seguida em várias partes do mundo, porém, está ultrapassada. Nesse sentido, Lopes et al. (1984) esclarece que se o tempo de mistura exceder o indicado, poderão ocorrer desmisturas, mostrando não ter havido maior homogeneidade com um aumento no tempo de mistura. McEllhiney (1985), já num trabalho mais detalhado, afirma que, dependendo do tipo de misturador, o intervalo de funcionamento após a entrada do último ingrediente deva ser entre 15 a 30 minutos, portanto, estabelecendo o limite superior de tempo que faltou no seu trabalho de 1982.

Entretanto, foi o trabalho de Poux et al. (1991) que possibilitou relacionar os tipos de misturadores com os seus respectivos tempos de mistura. Segundo estes autores, para os misturadores do tipos vertical e horizontal o tempo recomendado varia entre 5 a 30 minutos, e para os de tipo “Y” e “V” os autores recomendam de 1 a 10 minutos de processamento.

Para esta tese, cujos ingredientes foram misturados em aparelho do tipo “Y”, adotou-se o tempo de 5 minutos após o último carregamento, portanto, seguindo-se as recomendações consagradas no início da década de 90.

6. 6. Características físicas dos ingredientes de rações

Segundo Fpost (1976), cinco características das partículas sólidas podem interferir no processo de mistura: tamanho da partícula, peso específico, higroscopicidade, susceptibilidade à cargas elétricas e adesividade da partícula. Numa análise de sucessivos trabalhos nessa linha de pesquisas, a complexidade dos fenômenos inerentes às características físicas dos ingredientes levaram à interessantes observações, consideradas nesta tese.

Para trabalhos que envolvem muitos conceitos convém resumí-los na discussão, mesmo que já tenham sido citados na revisão bibliográfica. Axe (1995), num estudo mais recente e detalhado, já apresenta oito fatores que poderiam afetar a uniformidade de uma mistura: tamanho de partículas (com mecanismos de segregação inerentes à trajetória, ângulo de repouso, percolação de partículas finas, elevação de partículas grossas em vibração, segregação de pó), número de partículas, configuração das partículas, densidade, carga eletrostática, empoeiramento, higroscopicidade e escoamento. Pela natureza dos fractais, mecanismos de segregação como trajetória, ângulo de repouso, percolação de partículas, elevação de partículas grossas em vibração, segregação de pó e o fator configuração das

partículas, poderiam sofrer efeitos de dimensão fractal. Num misturador do tipo “Y” devidamente aterrado e calibrado, na prática podem ser extremamente amenizados os seguintes mecanismos: trajetória, percolação e elevação (motivados pela vibração do aparelho), além dos fatores densidade, carga eletrostática e escoamento. Já com a padronização em tamanho dos ingredientes, reduz-se drasticamente os mecanismos: percolação, elevação, segregação de pó, e os fatores: número de partículas e empoeiramento. Trabalhando em ambientes secos e com embalagens apropriadas, o efeito higroscopicidade será pequeno no contexto dos outros fatores que afetam o processo de mistura. Todas essas observações, levam a enfatizar que o fator configuração das partículas é aquele que não apresenta possibilidades de controle pelos meios convencionais, lançando-se a possibilidade de realizá-lo pelas características fractais. Assim, a forma (fractal) das partículas dentro de um misturador, poderá influenciar direta ou indiretamente à estes fatores segregantes em termos de trajetória, ângulo de repouso, percolação, elevação, segregação de pó, número de partículas, densidade, empoeiramento higroscopicidade e escoamento. Em suma, todos os fatores que afetam a uniformidade de uma mistura e que tenham relação com a forma irregular dos ingredientes, têm relação com a dimensão fractal. Isto pode ser, inclusive, entendido com relação à higroscopicidade em cujos poros das partículas ingredientes se deposita a água superficial e até interna, conforme o tamanho destes.

Devido a multiplicidade das variáveis, consideradas até então como caóticas em estrutura e dinâmica, foram propostas alternativas válidas para melhorar esse processo. Para McEllhiney (1982), isto poderia ser amenizado quando se fazia uma pré-mistura, e de fato esta conduta industrial é realizada em muitas indústrias de rações. Costuma-se misturar ingredientes como sulfato de cobalto, iodeto de cálcio ou potássio, selenito de sódio, que entram em muito pequenas partes na mistura total, entre si e com um diluente ou carregador que pode ser o carbonato de cálcio (calcita) ou o fosfato bicálcio. Esta mistura é normalmente realizada manualmente, em pequenos recipientes, sendo levada posteriormente aos misturadores. Dessa idéia de pré-mistura surgiu o premix, que corresponde a um produto industrializado já pronto e que será misturado numa porção aproximadamente de 10 a 100 vezes maior. McEllhiney (1985) enfatiza a importância da preparação de premix, conforme também é motivo deste atual trabalho e de Spadotto et al. (1996a) que coloca como procedimento experimental a padronização das operações. Nesse trabalho, os autores realizaram um trabalho prático de confinamento de gado bovino, com as dificuldades de um trabalho de campo, portanto. Mesmo assim, na metodologia, os ingredientes alimentares foram sempre misturados num mesmo padrão de manejo.

6. 7. Exames das rações

O exame de uma mistura em função de sua homogeneidade requer conhecimento dos objetivos a serem alcançados e, de fato, a qualidade de uma

mistura depende muito da escala na qual é examinada. Para Danckwerts (1953), a escala de exame de ingredientes de alimentos é o mínimo tamanho da região de segregação a qual poderia a mistura ser observada como imperfeitamente misturada. O que cada animal deveria receber, segundo Harnby (1985), deve ser o ponto essencial no exame de uma ração animal para obter-se melhor produtividade.

Já Rielly et al. (1994) trabalhando com partículas com duas cores diferentes, confirmam as observações anteriores, definindo o termo mistura completa. Assim, o exame de uma mistura, continuam esses autores, as definições estatísticas são de pouco valor na prática, recomendando como o mais indicado para cada caso os objetivos nutricionais a serem alcançados. Nesse sentido, adotou-se para este trabalho coletar, na boca do misturador, 2g de material misturado como amostra, isso representando 4% da mistura total. Esse 4% representa, na prática, um valor intermediário na percentagem que um premix comercial entra na composição de uma ração completa, quer de animais de pequeno ou grande porte, portanto, um valor no qual não poderia haver falta de homogeneidade.

Os índices de misturas homogêneas foram muito pesquisados como meio de agilizar as fases produtivas em agroindústrias. Em termos genéricos segundo Fan & Chen (1990), esses índices são estabelecidos a partir de componentes chaves que deveriam estar presentes nas escalas de exames estabelecidas. Este foi o caso do sulfato ferroso nesta tese, que serviu como referência de mistura homogênea. Porém, os autores acima referidos não esclarecem a diferença entre índice de mistura e

escala de exame. Escala de exame é a quantidade de material que é retirada de uma mistura, ou, é o tamanho da amostra; Já, índice de mistura é a quantidade de certo ingrediente que se espera encontrar numa determinada amostra. Antes de referir-se conclusivamente como tendo havido falta de clareza por parte desses dois autores, cita-se que, como observaram Poux et al. (1991), que existem muitos termos definidos nessa área que deveriam ser padronizados. Mais uma vez, como concluem estes últimos, a elaboração de medidas práticas e específicas, como foi adotada nesta tese, é o mais recomendado. Assim, aqui empregou-se como índice de mistura homogênea, uma mistura formulada com exatidão a partir de análises específicas dos seus ingredientes.

6. 8. Tipo de misturador

O desenho de um misturador mostra as suas aptidões. Lehtola & Kuoppamäki (1982) estudaram esses desenhos, entretanto somente foram classificados por Niranjan et al. (1994). Estes últimos autores classificaram os misturadores em 3 categorias de acordo com os materiais a serem misturados, e concluem que de uma escolha cuidadosa dependerá a qualidade e eficiência do processo de mistura.

É corrente no meio industrial que misturador mais recomendado para processar partículas sólidas de ingredientes minerais para rações é o de tipo “Y”. Na realidade, embora isso seja consenso no meio industrial, nas propriedades agropecuárias ou pequenas agroindústrias, o tipo mais usado é o vertical.

McElhiney et al. (1982) e Lopes et al. (1984), entretanto, esclarecem que o misturador de modelo vertical sujeita o material ali processado à grandes variações em função de sua densidade, quando o fluxo mais rápido de ingredientes fica mais perto da espiral e o mais lento longe desta. Em trabalho posterior, McElhiney (1985) recomenda o misturador de tipo “Y” como forma de obter-se uma mistura mais homogênea, criticando, porém, a operacionalidade destes aparelhos na linha de produção industrial.

Fan & Chen (1990) esclarecem os principais mecanismos de ação dos misturadores, dizendo que os de tipo vertical e horizontal têm como mecanismo principal a convecção e apresentam alta possibilidade de segregação de ingredientes e os de tipos “Y” e “V” atuam por difusão e apresentam baixa possibilidade de segregação de ingredientes.

Apesar de não ser atualmente o tipo de misturador mais usado nas agroindústrias de pequeno porte, foi escolhido para este experimento o tipo “Y”, por funcionar praticamente independente da densidade dos ingredientes. Esta escolha é corroborada por muitos trabalhos atuais, como Poux et al. (1991) que recomenda os misturadores de tipo “Y” e “V” para processar materiais secos em geral com precauções para materiais com tendência à aglomeração. Em termos hipotéticos, poderia ser esta “tendência à aglomeração” uma característica intrínica da dimensão fractal dos ingredientes.

6. 9. Cuidados no processamento de rações

As atividades nas indústrias de alimentos dependem de alta tecnologia e métodos precisos. Conforme cita McElhiney (1985), trabalhar com misturas de alimentos completos necessita de cuidados para que o produto não seja desuniforme. No presente trabalho, adotou-se padronizar todos os procedimentos, sendo esses: posição de carregamento, ordem de entrada de ingredientes, posição inicial do misturador, deposição interna dos ingredientes, posição de parada do aparelho, abertura para descarga, além, evidentemente, das quantidades, conforme proposta de Spadotto et al. (1996a).

6. 10. Caráter prático desse experimento

Muitas teorias foram desenvolvidas para estudar o processo de misturas de sólidos. Entretanto, conforme Poux et al. (1991), o resultado disso foi uma confusão generalizada de definições e observações que não correspondem a realidade de uma indústria dessa natureza. Para este trabalho, fez-se a opção por um trabalho prático, tomando-se os cuidados para representar a realidade, valendo-se dos anos de experiência do autor nas indústrias do ramo de rações animal. Procedeu-se dessa maneira, objetivando-se transformar em tecnologia as pesquisas aqui executadas.

6. 11. Grandezas físicas, dimensões e suas relações com fractais

É de conhecimento amplo que as grandezas físicas volume e massa são definidas claramente pela Física (Martins, 1979), (Holliday et al., 1980), (Streeter & Wylie, 1980). Já Webster (1980) oferece uma abertura nessas conceituações ao explicar o significado de densidade, dando exemplos nos quais este termo pode ser aplicado relacionando-se às dimensões euclidianas diferentes de 3. Por analogias, para o trabalho com fractais, serviram como referência para definir-se volume aparente (V_2), massa aparente (M) e, consequentemente, densidade aparente (d_2). Dessa maneira, pretende-se diminuir as confusões quanto à nomenclatura ou definições das grandezas físicas tradicionais quando relacionadas com as novas propostas na área de fractais. A eficiência dessa nomenclatura e nova conceituação, pode ser constatada na Quadro 1, quando através da densidade aparente dos Modelos Clássicos de Fractais, determina-se com exatidão as dimensões fractais pelo uso da fórmula $D = \log V_2 / \log {}^b\sqrt{d_2 \times V_2}$. Apesar de serem de certo modo estranhos esses novos conceitos, se prestam à determinar a dimensão fractal com exatidão sendo, portanto, confiáveis. Fez-se a opção por adotar as nomenclaturas de volume aparente, massa aparente e densidade aparente objetivando-se contemplar dois pontos básicos: a) Diferenciar dos conceitos tradicionais da Física, b) Manter um elo de ligação com a nomenclatura original. Desse modo, a didática mostra-se

mais rápida, conforme o autor desta tese tem constatado nos cursos que ministra a profissionais de áreas diversas.

6. 12. Unidade fractal e matriz fractal

Uma das chaves para a compreensão e trabalho prático com dimensão fractal está no trabalho proposto por Spadotto & Guerrini (1996). Nesse trabalho foram estabelecidos os seguintes conceitos: unidade fractal (UF) é uma quantidade qualquer reduzida à dimensão “1” e, matriz fractal (MF) corresponde ao todo do sistema fractal. Deve-se observar que, nesses casos, não foram preestabelecidas nenhuma unidade de medida, mas sim, inferido que a unidade fractal tem uma relação com a matriz fractal. Essa relação, continua o referido trabalho, corresponde à seguintes fórmulas: $D = \text{todo} / \text{parte}$ ou $D = \log(MF) / \log(UF)$. Entretanto, para melhor visualização do fenômeno fractal, deve-se entender que a unidade fractal pode ser formada de outras unidades, as quais se denominou de unidade fractal estrutural (UFE). Assim, um fractal é formado por uma matriz fractal e uma unidade fractal, sendo que esta última pode ser formada por pequenas estruturas ou pequenas partes - cada uma dessas pequenas partes é a UFE. Com o objetivo de melhor visualizar os tópicos dessa discussão, abaixo são apresentados alguns dos modelos de fractais clássicos com os tópicos discutidos nesta seção

Quadro 6
Valores de dimensão fractal comparados com MF, UF, UFE.

Modelos de Fractais	Dimensão Fractal	MF	UF na MF	UFE	UFE na UF
Poeira de Cantor	0,63	2	3	2	2
Curva de Kock	1,26	4	3	4	3
Triângulo de Sierpinsky	1,58	3	2	3	2
Carpete de Sierpinsky	1,89	8	3	8	3
Esponja de Menger	2,73	20	3	20	3

Modelos no primeiro nível de iteração (n=1).

Compreende-se, então, o caso de materiais porosos, como solo ou ingredientes sólidos de rações, onde a unidade fractal é composta por inúmeros grãos ou partículas, sendo cada uma dessas uma UFE.

6. 13. Fractais: origem e modelos clássicos

A atualidade desta tese pode ser confirmada por dois fatores: a necessidade de otimizar o processamento e armazenamento de rações e pelo fato de aplicar os conceitos de fractais. Com relação à energia, já foi discutido anteriormente cabendo, agora, ser abordado a questão fractal.

Em termos de Ciência 20 anos pouco representam, alguns pesquisadores poderão argumentar; entretanto, a velocidade com que se vencem os novos paradigmas atualmente, é muito maior do que 50 anos atrás. Assim nasceu o que se está chamando de Ciência Fractal: Em 1975, data mais aceita, com o polonês

(Benoit Mandelbrot, 1982). Para quem acreditava que seria somente algo passageiro, o emprego dos conceitos e técnicas fractais em quase todas as áreas, fazem esses pesquisadores refazerem as suas posições de críticos.

Dentre os chamados Modelos Clássicos de Fractais, que são encontrados na maioria das publicações sobre esse assunto, destacam-se os seguintes: Poeira de Cantor ($D=0,63$), Curva de Kock ($D=1,26$), Triângulo de Sierpinsky ($D=1,58$), Estrela de Davi ($D=1,77$), Fractal de Duerer ($D=1,84$), Carpete de Sierpinsky ($D=1,89$) e Esponja de Menger ($D=2,73$) (Feder, 1978), (Mandelbrot, 1982), Gleick (1994). Esses modelos evidentemente foram construídos dentro dos parâmetros que definem os fractais e, portanto, servem de referência para futuros ajustes. Quando se propõe uma nova fórmula e esta apresenta como resultados os valores exatos desses modelos de fractais clássicos, conclusivamente essa fórmula pode ser empregada para essa finalidade. Assim é o caso da presente tese, pois a fórmula aqui proposta, $D = \log(V_2) / \log(\sqrt[b]{d_2} \cdot V_2)$ ou $D = \log(V_2) / \log(\sqrt[b]{M})$, cumpre o papel de satisfazer esta hipótese. Isso pode ser observado na Quadro 1, onde os resultados de D obtidos pela fórmula aqui proposta para os modelos clássicos são exatamente os mesmos da literatura. Ainda, para mostrar a validade e flexibilidade dessa fórmula, na mesma Quadro são apresentados os valores de dimensão euclidiana ou inteira (D_i); Para tanto, os modelos fractais foram transformados em inteiros e sobre os mesmos foi aplicada a fórmula aqui proposta. Mais uma vez, os resultados obtidos foram

exatamente os mesmos da literatura e da Física, portanto, os conceitos e fórmula propostos nessa tese podem abranger a já tradicional dimensão Euclidiana.

6. 14. Comportamento da densidade aparente

Segundo Spadotto et al. (1997b,) a densidade aparente apresenta relação inversa com a dimensão fractal, porém, os resultados da Quadro 1 mostram que esta relação parece de certo modo não explícita. A perfeita visualização desse fenômeno somente pode ser realizada se forem divididos os modelos fractais em grupos ou sistemas relacionados à dimensão referência inteira. Assim, Poeira de Cantor e Curva de Kock se originam na dimensão “1” formando um grupo, Triângulo de Sierpinsky, Estrela de Davi, Fractal de Durer e Carpete de Sierpinsky formam o grupo originado na dimensão “2”, e isso poderia ser feito para outros modelos de fractais. Com essas diretrizes, a observação dos modelos de fractais clássicos, na dimensão referência “2” por exemplo, da Quadro 1, mostrará que de fato a dimensão fractal tem relação inversa com a densidade aparente. A esse fato, deve-se considerar que Spadotto et al. (1997b) trabalharam com materiais porosos e não com modelos clássicos de fractais, porém, aplicando a mesma fórmula e conceitos aqui propostos. Já na Quadro 2 os fractais derivam da Esponja de Menger, e os resultados, mais uma vez mostram que a dimensão fractal tem relação inversa com a densidade aparente, ficando evidente que isso ocorre para um mesmo fractal originador quando diminui-se o seu volume. Esse tipo de análise tem grande importância prática, pois um dos

maiores problemas dos pesquisadores ou técnicos é saber se o material ou sistema de seu interesse é fractal ou não.

Como diretrizes à futuras pesquisas, um fractal tem como comportamento uma relação inversa entre D e d_2 , desde que sejam originados numa mesma dimensão inteira; E por mesma dimensão inteira entende-se comprimento, área ou volume.

6. 15. Ligações entre MF, UF, UFE e V_2 , M em materiais porosos

Entretanto, não é nada prático ficar contando o número de grãos que estão ligados à dimensão um para achar a UF. Por dedução lógica do que foi exposto anteriormente, existe relação entre a quantidade de partes, grãos de solo por exemplo, e UF. A evidente falta de praticidade em se contar essas minúsculas partículas, manualmente ou por outros métodos laboratoriais sofisticados, motivou a execução de experimentos de ajustes de unidades de medidas. Nesse sentido, tomando-se como base os resultados de dimensões fractais como os de Ahl & Niemeyer (1989), Toledo et al. (1990), Esbensen Jr. (1991), Rieu & Sposito (1991a), Young & Crawford (1991), Tyler & Wheatcraft (1992), Scott & Stephen (1992), verificou-se que, nas cubetas as unidades de cm^3 para V_2 e g para M ofereciam valores dentro da faixa esperada comparados com os trabalhos acima citados. Evidentemente, deve-se entender que, nesses casos, cm^3 correspondem a quantidades de UFE na MF e UF.

6. 16. Ajuste do MC-D

O método para determinar a dimensão fractal através de cubetas (MC-D), tem como fundamentos a fórmula já discutida anteriormente e a possibilidade de se moldar em cubetas materiais porosos como solo ou ingredientes de rações. A eficiência dos novos conceitos e da fórmula proposta já foram comprovados, cabendo, então, a discutir o MC-D.

Os dados mostrados na Quadro 3 quando comparados com a revisão de literatura aqui apresentada, mostram que os resultados estão dentro do esperado. Embora Tyler & Wheatcraft (1989) e Perfect & Kay (1991) tenham propostos resultados de D menores que 2 e maiores que 3 para solos, outros autores contestaram esses valores levando-os a retratação em trabalhos posteriores. No entanto, para Perfect et al. (1992), embora seus resultados ainda estivessem fora da faixa esperada, os mesmos concordaram com Turcotte et al. (1986), Sander (1986), Schroeder (1991), quando relacionam tamanho das partículas e dimensão fractal. Os resultados para o ajuste do MCD que são mostrados na Quadro 3 concordam com os quatro últimos trabalhos anteriormente citados e com Ahl & Niemeyer (1989), Toledo et al. (1990), Esbenshare Jr. (1991), Rieu & Sposito (1991a), Young & Crawford (1991), Tyler & Wheatcraft (1992), Scott & Stephen (1992). O que fica claro com os resultados desta tese e com todos os trabalhos citados nesta seção, é que para partículas semelhantes a esferas, a dimensão fractal varia inversamente com o diâmetro dessas - maior o diâmetro equivale a menor dimensão fractal. O Quadro 3

retrata bem essa situação - pois o solo tem partículas semelhantes à esferas, embora, não exatamente - sendo que Areia Quartzosa tem partículas maiores que Latossolo Vermelho Amarelo e, este, tem partículas maiores que Terra Roxa Estruturada. Convém esclarecer, mais uma vez, que esses tamanhos de partículas não podem ser inferidos pela densidade aparente (d_2) pelos motivos acima discutidos.

6. 17. Relações de D, tamanho de partículas e o MC-D

Certamente, agrupar partículas semelhantes à esferas não é o mesmo que agrupar partículas com outras formas. Para constatar-se essa diferença, basta imaginar os 27 cubos da Esponja de Menger transformados em esferas e agrupados da melhor maneira a reduziu-se os espaços. Na Esponja de Menger original, com os 27 cubos colocados adequadamente, os mesmos preencheriam todos os espaços e a dimensão seria igual à 3. Por outro lado, se fossem esferas, esse valor nunca seria atingido, a despeito de o número de partículas ser o mesmo.

Materiais com partículas semelhantes à esferas, como no caso de solo, apresentam uma relação definida entre dimensão fractal e o tamanho desses constituintes. Rieu & Sposito (1991) encontraram valores de $D = 2,88$ para areia + argila, $D = 2,91$ para uma mistura com mais argila e $D = 2,95$ para a argila. Semelhante trabalho foi desenvolvido por Scott & Stephen (1992), encontrando que a dimensão fractal tinha uma relação inversa ao raio das partículas de solo. No

Quadro 3, embora não sejam apresentados resultados de composições, observa-se que solos com tamanhos de partículas maiores têm dimensões fractais menores, estando de acordo com os autores acima referidos.

A relação da dimensão fractal com os poros formados no interior de materiais porosos encontrada nesta tese, também, encontra suporte em Guerrini et al. (1996) e Guerrini et al. (1997), quando trabalharam com infiltração de água, em movimentos horizontais e verticais, respectivamente. De fato, consideradas formas semelhantes à esferas, se um material poroso tem partículas maiores terá dimensões fractais menores e maiores espaços internos maiores. Como consequência, a água se infiltrará mais rapidamente e, nesta tese, sugere-se um comportamento diferenciado dessas partículas no MC-D, num misturador de rações e na estocagem desses materiais.

6. 18. Relação de D e d_2 pelo MC-D

Tanto a Quadro 3 como a Quadro 4 mostram que d_2 é inversamente proporcional à dimensão fractal. Analisando-se a Quadro 2 que mostra os resultados da Esponja de Menger (reconhecido modelo de materiais porosos) conjuntamente com as Quadros 3 e 4, observa-se que d_2 é inversamente proporcional a dimensão fractal para estes resultados. Entretanto, esta mesma comparação não pode ser feita com relação à Quadro 1, onde os fractais têm bases em dimensões euclidianas diferentes.

6. 19. Cuidados na aplicação do MC-D

Um método concebido para ser prático e amplo pode ter limitações, embora essas não invalidem o seu uso. Entretanto, essas limitações podem ser diminuídas ou eliminadas com ajustes particulares, pois, os fundamentos propostos nessa tese são consistentes.

O primeiro cuidado refere-se ao enchimento das cubetas, pois constatou-se que o maior erro na repetição do experimento está em se colocar quantidades diferentes de material. A colocação das cubetas numa superfície plana sendo enchidas por um dispositivo com diâmetro de saída de material de 0,5 cm colocado à 2 cm de altura e no centro a partir da parte superior das cubetas, aliada às técnicas anteriormente mencionadas, diminuirão esses erros. O segundo cuidado trata de nivelar o material compactado, de modo que a média das quatro medidas de altura sejam a mesma. O terceiro cuidado refere-se à compactação do material nas cubetas, que deve ser feito de modo que não falte pressão no socador e nem se comprima muito a ponto de quebrar as partículas; Se isso ocorrer, embora seja difícil, o material ali depositado poderá assumir uma outra dimensão fractal que não a original e de interesse imediato.

Hoje, os valores de D encontrados para solos não são precisos conforme constata-se por Ahl & Niemeyer (1989), Toledo et al. (1990), Esbenshare Jr. (1991), Rieu & Sposito (1991a), Young & Crawford (1991), Tyler & Wheatcraft (1992), Scott & Stephen (1992). Além disso, não existe um valor exato de D para esse tipo

de material, e provavelmente não será um valor exato o mais interessante, visto que uma solução situacional seja mais realística. Nesse sentido, por exemplo, pode ser mais interessante saber a dimensão fractal de um solo num determinado local e numa situação particular de adubação, trabalhos mecânicos, matéria orgânica ou enraizamento, do que simplesmente saber a dimensão fractal comparada com a sua classificação quanto ao tipo. Provavelmente, uma informação complementar a outra.

6. 20. Expansão do MC-D

Os conceitos, a fórmula e toda a metodologia aplicada no MC-D podem ser expandidas. Nessa tese, também, sugere-se que se aplique esta tecnologia para amostras indeformadas de materiais porosos. Para tanto, basta calcular o volume de uma amostra indeformada, que pode ser um cilindro por exemplo, e aplicar-se a mesma fórmula Spadotto e conceitos aqui propostos. Desse modo, pode-se avaliar a situação real do solo ou outro material poroso, porém, deve-se considerar que o sistema assim formado pode ser multi-fractal, ou seja, formado por mais de um sistema fractal ou fractal. Nesse caso, o autor dessa tese recomenda o uso do termo dimensão fractal aparente, conforme já proposto em Spadotto & Guerrini (1996), já que os valores poderão ser a combinação de várias dimensões fractais e ultrapassando o valor 3.

6. 21. Perspectivas no emprego da Dimensão Fractal

Dimensão Fractal já é empregada em muitas áreas e se expandirá ainda mais, servindo primeiramente para classificar as formas e fenômenos isoladamente. Entretanto, essa necessidade didática de se isolar os sistemas fractais deverá ser substituída por métodos de análises que possibilitem trabalhar com sistemas multifractais, conforme é aqui proposto com a fórmula Spadotto e o MC-D com suas expansões.

6. 22. Racionalização de energia no processamento de rações

A Quadro 5 mostra como se misturaram estes ingredientes de rações animal com relação a combinação da dimensão fractal de cada um. A hipótese é de que elementos porosos com dimensões fractais diferentes misturam-se com velocidades diferentes, nas mesmas condições.

Estabelecidas as mesmas condições de mistura, conforme relatado anteriormente, foram misturados Sulfato Ferroso ($D=2,80\pm0,01$) com Óxido de Zinco ($D=2,26\pm0,01$) e o mesmo Sulfato Ferroso ($D=2,80\pm0,01$) com Óxido de Magnésio ($D=2,66\pm0,01$). A combinação de ingredientes que mais se aproximou da homogeneidade ideal ($2,56\pm0,05$ % de Fe) foi Sulfato Ferroso com Óxido de Zinco ($0,58\pm0,03$ % de Fe) e a que mais se afastou foi Sulfato Ferroso com Óxido de Magnésio ($0,03\pm0,01$ % de Fe). Facilmente observa-se a grande diferença entre os

índices de homogeneidade Fan & Chen (1990) ($0,58 \pm 0,03$ % para $0,03 \pm 0,01$ %), eliminando a necessidade de aplicar-se inferências estatísticas nesse caso.

Existem fortes evidências de que quando se misturam dois ingredientes sólidos porosos desestruturados com dimensões fractais diferentes, eliminando-se outras interferências conforme descrito anteriormente, essas dimensões influenciam no tempo de mistura. Pelo que foi observado na Quadro 5, ingredientes sólidos porosos desestruturados combinam-se mais rapidamente tendendo à homogeneidade quando têm dimensões fractais mais distantes entre si. De fato, o Óxido de Zinco ($D=2,26 \pm 0,01$) está mais distante do Sulfato Ferroso ($D=2,80 \pm 0,01$) do que o Óxido de Magnésio ($D=2,66 \pm 0,01$).

6. 23. Homogeneidade e dimensão fractal

Partículas sólidas em processo de mistura sofrem influência de diversos fatores e, dentre esses a forma Axe (1995); A dimensão fractal, fator que está intimamente associado à forma Mandelbrot (1982) também é um desses fatores. A forma, e não tamanho, como já de conhecimento amplo em Física, pode influenciar na higroscopicidade, susceptibilidade à cargas elétricas e adesividade de partículas. Além disso, não é difícil de visualizar as partículas colidindo entre si e com os componentes de um misturador num processo de mistura; Por exemplo, ângulos profusos e áreas lisas facilitam os desvios, enquanto que ângulos suaves e áreas

rugosas aumentam as colisões. Uma dimensão fractal maior implica em menores espaços entre as partículas, ou melhor combinação das formas das mesmas Mandelbrot (1982), Feder (1988), Bird (1993); E essa combinação gerará uma nova dimensão fractal que, não necessariamente, representará uma mistura mais ou menos homogênea. Por essa razão, não recomenda-se aqui afirmar-se que, um aumento ou diminuição da dimensão fractal do produto da mistura com relação aos ingredientes, possa representar a uma melhor ou pior homogeneidade. Isso também pode ser explicado pelo fato de que os espaços vazios de um produto de mistura não conterem qualquer dos ingredientes misturados. O que realmente interessa em homogeneidade, é a distribuição dos ingredientes no volume final, sendo que isso pode ser obtido por um aumento ou diminuição da dimensão fractal do produto com relação aos ingredientes, que podem possuir formas variadas. O mesmo não pode ser dito com relação a relevância dos espaços vazios para o armazenamento e embalagem de produtos sólidos particulados: Pode não interessar armazenar espaços vazios, e nisso pesquisas com dimensão fractal desses ingredientes poderiam indicar como reduzi-los, além de homogeneizá-los com mais eficiência.

Sendo que dimensão fractal menor representa mais espaços vazios do que dimensão fractal maior, a maior facilidade de homogeneização pode ser explicada pela penetração de outros ingredientes de dimensões maiores nesses espaços; Por outro lado, dimensões fractais mais próximas representam maiores chances de colisões ou restrições à movimentação de um ingrediente com relação ao outro,

portanto, dificultando a homogeneidade. No mesmo sentido, a mistura de ingredientes com dimensões fractais mais altas é mais dificultosa, porque os espaços vazios para a movimentação das partículas são limitados; Assim, a mistura de ingredientes com dimensões fractais mais baixas devem ser preferidas.

6. 24. Campo de pesquisas e tecnologia

Com tantos recentes e inéditos parâmetros lançados nesta tese, condicionalmente coloca-se a necessidade de se realizar novas pesquisas nessa linha de trabalho. Os instrumentos fractais estão bem estabelecidos, entretanto: Com certeza, novos conhecimentos serão obtidos se realizar-se misturas com vários ingredientes ao mesmo tempo, em tempos diferentes, com misturadores diferentes e com implicações nos processos de estocagem de rações, alimentação e nutrição animal. Assim, no sentido de oferecer ferramentas inéditas, este trabalho avançou ao ponto de interessar ao desenvolvimento de nova tecnologia.

7. CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos e nas condições de presente trabalho, pode-se concluir que:

Em termos da hipótese proposta:

Existe relação entre o processo de mistura de ingredientes sólidos de rações com a dimensão fractal.

Em termos gerais:

- A Fórmula Spadotto $D = \log(V_2) / \log(\sqrt[b]{M})$, também expressa como $D = \log(V_2) / \log(M^{(1/b)})$ ou $D = \log(V_2) / \log(M^{(1/b)})$, determina com exatidão a dimensão fractal dos modelos clássicos fractais, encontrando os mesmos resultados da dimensão de Hausdorff.
- O MC-D permite determinar a dimensão fractal em materiais porosos como ingredientes de rações, podendo ser expandido para amostras indeformadas com formas diversas. Os valores de D aqui obtidos são precisos, mas não existem parâmetros para avaliar sua exatidão, até o encerramento desta revisão.

- Combinando-se dois materiais porosos fragmentados desestruturados, como ingredientes de rações animal, com dimensões fractais mais distantes entre si, obtém-se maior homogeneidade no mesmo tempo de mistura, comparativamente com ingredientes com dimensões fractais mais próximos. O mesmo deve ocorrer se preferir misturar ingredientes com dimensões fractais mais baixas do que as de dimensões fractais mais altas. Como consequência dessa diminuição no tempo de processamento, haverá economia de energia.
- Um vasto campo de pesquisas e desenvolvimento de nova tecnologia foi aberto com este trabalho.

9. LITERATURA CITADA

- AHL, C. & NIEMEYER, J. The fractal dimension of the pore-volume inside soils. *Zeitchrift für Pflanzenernährun und Bodenkunde*. v.152, p. 457-458, 1989.
- ANDRIGUETTO, J. M.; GEMAEL, A.; SOUZA, G. A.. *Normas e Padrões de Nutrição e Alimentação Animal*. Curitiba, Nutrição, 1985. 140p.
- ASSUMPÇÃO, C. R. *Características do consumo de energia elétrica numa destilaria de aguardente*. Botucatu, 1986. 70p. Tese. Faculdade de ciências Agronômicas - Universidade Estadual Paulista.
- AVNIR, D.; FARIN, D.; PFEIFER, P. Surface geometric irregularity of particulate of structural units of solonetztes. *Soviet Soil Science*, v.21,p.97-107, 1989.
- AXE, D. E. Factors effecting uniformity of a mix. *Animal Feed Science and Technology*, v.53, p.211-220, 1995.

BARTOLI , F.; PHILIPPY, R.; DOIRISSE, M.; NIQUET, S.; DUBUIT, M.

Structure and self-similarity in sity and sandy soils: the fractal approach. *J. Soil Sci.* v.42, p.167 - 185, 1991.

BIRD, K. S. *Fractls in Chemistry, Geochemistry and Biophysics*. New

York: Plenum Press, 1993. 263p.

BOCCARA, N. & DAOUD, M. *Physics of Finely Divided Matter*

Springer, Berlin. 1985. 260p.

CERADA, P. M. & SANCHES, L. *Manual de Armazenamento e Embalagem*.

FEPAF, Botucatu. 1985. 194p.

CRAWFORD, J. W.; SLEEMAN, B. D.; YOUNG, I. M. On the relation between

number-size distributions and the fractal dimension of aggregates. *Journal of Soil Science.* v.44, p.555 - 565, 1993.

CRAWFORD, J. W. The relationship between structure and the hydraulic

conductivity of soil. *European J. of Soil Science.* v.45, p.493 - 502, 1994.

DANCKWERTS, P. V. Theory of mixtures and mixing. *Research-London*, v.6, p.355-361, 1953.

ESBENSHARE JR., D. H. Fractal Bread. *The Physics Teacher*. v.29, p.236 - 237, 1991.

FAN, L. T. & CHEN, Y. M. Recent developments in solids mixing. *Powder Technology*, v.61, p.255-287, 1990.

FEDER, J. *Fractals*. Plenum Press. New York. 1988. 283p.

FELTRE, R. *Fundamentos da Química*. Moderna. São Paulo. 1991. 554p.

GUERRINI, Ivan A.; SWARTZENDRUBER, D. Fractal characteristics of the horizontal movement of water in soils. *Fractals*, River Edge, v.2, n.3, p.465-468, 1994.

GUERRINI, IVAN A.; NASSER, M. D.; HIRANO, A. H.; SPADOTTO, A. J. Fractals aspects of the wetting front advance of horizontal soil-water movement. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13, 1996, Águas de Lindóia. Anais...Águas de Lindóia, 1996.

GUERRINI, Ivan A.; SPADOTTO, A. J.; CARREIRA, M. C.; CARVALHO, J. A.

Influência da densidade do solo na determinação da dimensão fractal da infiltração vertical. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 26, 1997, Rio de Janeiro, Anais...Rio de Janeiro, 1997.

GOLDEMBERG, J. *Energia no Brasil*. LTCE, Rio de Janeiro. 1979. 171p.

HARNBY, N. *Mixing in the Process Industries*. Butterworths, London. 1985. 78p.

HOLLIDAY, D.; SESINIK, R.; MERRILL, J. *Fundamentos de Física: Mecânica*. JC, Rio de Janeiro. 1994. 300p.

IBGE *Anuário Estatístico do Brasil*. Centro de Documentação e Disseminação de Informações, Rio de Janeiro. 1985. 628p.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. *Informações Econômicas*. IEA, Rio de Janeiro. 1989. 139p.

ISLABÃO, N. *Manual de Cálculo de Rações*. Pelotas, SAGRA, 1985. 177p.

KARE, B. H. *A Random Walk Through Fractal Dimensions*. VCH.

Weinheim. Germany. 1989. 262p.

KATZ, A. J. & THOMPSON, A. H. Fractal sand-stone pores: implications for conductivity and pore formation. *Physics Rev. Letters*. v.54, p.1325 -1328, 1985.

KAYE, B. H. *Image analysis techniques for characterizing fractal structures*. In: D. Avnir. *The Fractal Approach to Heterogeneous Chemistry Surfaces, Colloids, Polymers*. New York. 1989. p. 55-66.

KO, R. H. & BEAN, C. P. A simple experiment that demonstrates fractal behavior. *The Physics Teacher*. v.29, p.78 - 79, 1991.

LEHTOLA, S. & KUOPPAMÄKI, R. The measurement of mixing efficiency of continuous mixers. *Chemical Engineering Science*, v.37, p.185-191, 1982.

LEHNINGER, A. L. *Fundamentos de Bioquímica*. SARVIER, São Paulo. 1980. 463p.

LIODYD, D. E.; McDONALD, B. E.; CRAMPTON, E. W. *Fundamentos e Nutricion*. Zaragoza, ACRIBIA, 1982. 407p.

LOPES, D. C.; DONZELE, J. L.; ALVARENGA, J. C.; DA SILVA, D. J.

Determinação do tempo mínimo de mistura para obtenção de uma ração homogênea, em misturador vertical. *Rev. Soc. Bras. Zoot.*, v.13, p.285 - 291, 1984.

MANDELBROT, B. B. *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman, San Francisco. 1982. 468p.

MARTINS, N.; PAULI, R. U.; MAUAD, F. C. *Física para a Universidade: Análise Dimensional*. EPU, São Paulo. 1979. 133p.

McELLINEY, R. R. *Problems with mixing*. In: Feed International Kansas. State University, 1982. p. 34 - 38.

McELLINEY, R. R. *Feed Manufacturing Technology III*. American Feed Industry Association. Virginia. 1985. 546p.

MURPHY, C. P. *Thin Section Preparation of Soils and Sediments*. A.B. Academic Publishers. Berkhamsted, Herts. 1986. 163p.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Canadian Tables of Feed Composition*.

Washington, D. C., National Academy of Science, 1970. 84p.

NIRANJAN, K.; SMITH, D. L. O.; RIELLY, C. D. Mixing process for agricultural and food materials: Part 5, Review of mixer types. *J. Agric. Engng. Res Res.*, v.59, p.145-161, 1994.

PERFECT, E. & KAY, B. D. Fractal theory applied to soil aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* v.55, p.1552 - 1558, 1991.

PERFECT, E; RASIAH, V.; KAY, B. D. Fractal dimensions of soil aggregate-size distributions calculated by number and mass. *Soil Sci. Am. J.* v.56, p.1407 - 1409, 1992.

PFOST, H. *Feed manufacturing technology*. 5 ed. Arlington, American Feed Manufacturers Association, 1976. p. 512 - 517.

PEITGEN, H. O. *The Science of Fractals*. Springer, Berlin. 1988. 563p.

POUX, M.; FAYOLLE, P.; BERTRAND, J. Powder mixing: Some practical rules applied to agitated systems. *Powder Technology*, v.68, p. 213-234, 1991.

- RIELLY, C. D.; SMITH, D. L. O.; LINOLEY, J. A. Mixing processes for agricultural and food materials: Part 4, assessment and monitoring of mixing systems. *J. Agric. Engng. Res*, v.59, p. 1-18, 1994.
- RIEU, M. & SPOSITO, G. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: I. Theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.* v.55, p. 1231 - 1238, 1991a.
- RIEU, M. & SPOSITO, G. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: II. Applications. *Soil Sci. Soc. Am. J.* v.55, p. 1239 -1244, 1991b.
- RODRIGUEZ, E. M. *Uso de energia elétrica no beneficiamento de café e na secagem de milho associada à produção de ração*. Botucatu, 1990. 84p. Tese. Faculdade de Ciências Agronômicas - Universidade Estadual Paulista.
- SANDER, L. M. Fractal growth processes. *Nature*. v.322, p. 789 - 793, 1986.
- SCHROEDER, M. *Fractals, Chaos, Power Laws*. W. H. Freeman and Company, New York. 1991. 429p.
- SCOTT, G. J. T.; WEBSTER, R.; NORTCLIFF, S. The topology of pore structure in cracking clay soil.II. Connectivity density and its estimation. *J. Soil Sci.* v.39, p. 315 - 326, 1988.

- SCOTT, W. T. & STEPHEN, W. W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.56, p. 362 -369, 1992.
- SERAPHIM, O J, *Tecnologia e Aplicação Racional de Energia Elétrica e de Fontes Renováveis na Agricultura*. Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, Campina Grande, 1997. 176p.
- SPADOTTO, A. J.; SILVEIRA, A. C.; FURLAN, L. R.; ARRIGONI, M. B.; COSTA, C.; OLIVEIRA, H. N.; PARRÉ, C. Avaliação da silagem de milho das variedades granífera e forrageira no desempenho de bovinos das raças Nelore e Canchim em regime de confinamento. *Journal of the Brazilian Society of Animal Science*, v.25, p.1-12, 1996a
- SPADOTTO, A. J.; GUERRINI, IVAN A. Fractais: Conceitos e paradigma através de estudos em materiais estruturados. In: REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 48, 1996. São Paulo. Anais... São Paulo: Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, 1996. p.561.
- SPADOTTO, A. J.; GUERRINI, IVAN A.; REZENDE, M. A. Método prático para a determinação da dimensão fractal aplicado nas áreas agrônômica e zootécnica. In: I SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 1, 1996. São Carlos. Anais... São Carlos, 1996b.

SPADOTTO, A. J.; GUERRINI, IVAN A.; REZENDE, M. A. Desenvolvimento de um método didático para a determinação da dimensão fractal. In: REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 49, 1997. Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte, 1997a. p.49.

SPADOTTO, A. J.; GUERRINI, IVAN A.; REZENDE, M. A. Análise da relação entre a dimensão fractal e densidade em materiais porosos de interesse agrônômico e zootécnico. . In: REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 49, 1997. Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte, 1997b. p.119.

SPADOTTO, A. J.; GUERRINI, IVAN A.; SERAPHIM, O. J. Uso racional de energia no processamento de minerais para alimentação animal através do uso da dimensão fractal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26, 1997. Campina Grande, Anais... Campina Grande, 1997c.

SPADOTTO, A. J.; GUERRINI, IVAN A.; REZENDE, M. A.; MIRANDA, J. R. Practical methods for determination of fractal dimension in porous material. In: WORD CONGRESS ON MEDICAL PHYSICS AN BIOMEDICAL ENGINEERING, 1997. Nice-French Riviera, Anais... Nice-French Riviera, 1997d.

STREETER, V. L. & WYLIE, E. B. *Mecânica dos Fluidos*. McCraw-Hill. São Paulo. 1980. 585p.

TOLEDO, P. G.; NOVY, R.A.; DAVIS, H. T.; SCRIVEN, L. E. Hydraulic conductivity of porous media at low water content. *Soil Sci. Soc. Am.J.*, v.54, p. 673 - 679, 1990.

TURCOTTE, D. L. Fractals and fragmentation. *J. Geophys. Res.*, v.91, p. 1921-1926, 1986.

TYLER, S. W. & WHEATCRAFT, S. W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* v.53, p. 987 - 996, 1989.

TYLER, S.W. & WHEATCRAFT, S. W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.56, p. 362-369, 1992.

WEBSTER, N. *A Webster's New Words Dictionary*. Prentice Hall Press. New York, NY. 1979. 2.289p.

YOUNG, I. M. & CRAWFORD, J. W. The fractal structure of soil aggregates: its measurement and interpretation. *Journal Soil Sci.*, v.42, p. 187 - 192, 1991.

APÊNDICE

Apêndice 1: Quadros de solos e minerais

Terra Roxa Estruturada: Dimensão fractal (valor médio) = $2,73 \pm 0,01$,
Densidade (valor médio) = $1,24 \pm 0,01$

Amostra	Volume (cm ³)	Massa (g)	Densidade (g/cm ³)	Dimensão Fractal
1	8,15	10,46	1,28	2,68
2	8,40	10,23	1,22	2,75
3	8,70	10,65	1,22	2,74
4	8,40	10,62	1,26	2,70
5	8,45	10,42	1,23	2,73
6	8,10	9,97	1,23	2,73
7	8,05	10,26	1,27	2,69
8	8,40	10,13	1,21	2,76
9	8,40	10,49	1,25	2,72
10	8,35	10,10	1,21	2,75

Desvios dados pelo erro padrão da média

Latossolo Vermelho Amarelo: Dimensão Fractal (valor médio) = $2,48 \pm 0,01$,
Densidade (valor médio) = $1,55 \pm 0,01$

Amostra	Volume (cm ³)	Massa (g)	Densidade (g/cm ³)	Dimensão Fractal
1	7,75	12,10	1,56	2,46
2	8,10	12,64	1,56	2,47
3	8,40	12,69	1,51	2,51
4	7,85	12,09	1,54	2,48
5	7,80	12,23	1,57	2,46
6	7,80	12,35	1,58	2,45
7	8,10	12,83	1,58	2,46
8	7,75	12,13	1,56	2,46
9	8,40	12,50	1,49	2,53
10	7,80	12,17	1,56	2,47

Desvios dados pelo erro padrão da média

Areia Quartzosa: Dimensão Fractal (valor médio) = $2,39 \pm 0,01$, Densidade (valor
médio) = $1,65 \pm 0,01$

Amostra	Volume (cm ³)	Massa (g)	Densidade g/cm ³)	Dimensão Fractal
1	7,50	12,74	1,70	2,37
2	6,85	11,14	1,63	2,39
3	7,20	12,01	1,67	2,38
4	6,25	10,59	1,69	2,33
5	6,85	11,09	1,62	2,40
6	7,55	12,47	1,65	2,40
7	7,00	11,66	1,67	2,38
8	6,80	11,51	1,69	2,35
9	7,50	11,99	1,60	2,43
10	7,00	11,09	1,58	2,43

Desvios dados pelo erro padrão da média

Sulfato Ferroso: Dimensão Fractal (valor médio) = $2,81 \pm 0,01$,
 Densidade (valor médio) = $1,13 \pm 0,01$

Amostra	Volume (cm ³)	Massa (g)	Densidade (g/cm ³)	Dimensão Fractal
1	7,20	8,42	1,17	2,78
2	5,45	6,20	1,14	2,79
3	6,60	7,22	1,09	2,86
4	7,20	7,86	1,09	2,87
5	6,05	6,74	1,11	2,83
6	6,00	6,80	1,13	2,80
7	6,00	6,80	1,13	2,80
8	7,10	8,41	1,18	2,76
9	5,45	6,22	1,14	2,78
10	6,60	7,60	1,15	2,79

Desvios dados pelo erro padrão da média

Óxido de Magnésio: Dimensão Fractal (valor médio) = $2,66 \pm 0,01$,
 Densidade (valor médio) = $1,25 \pm 0,01$

Amostra	Volume (cm ³)	Massa (g)	Densidade (g/cm ³)	Dimensão Fractal
1	6,00	7,50	1,25	2,67
2	6,05	7,63	1,26	2,66
3	5,40	7,21	1,33	2,56
4	6,05	7,45	1,23	2,69
5	6,00	7,24	1,21	2,71
6	6,00	7,41	1,23	2,68
7	6,00	7,44	1,24	2,68
8	6,00	7,59	1,26	2,65
9	6,00	7,40	1,23	2,69
10	6,00	7,66	1,28	2,64

Desvios dados pelo erro padrão da média

Óxido de Zinco: Dimensão Fractal (valor médio) = $2,26 \pm 0,01$,
 Densidade (valor médio) = $1,74 \pm 0,01$

Amostra	Volume (cm ³)	Massa (g)	Densidade (g/cm ³)	Dimensão Fractal
1	5,60	9,75	1,74	2,27
2	5,40	9,36	1,73	2,26
3	5,40	9,18	1,70	2,28
4	6,05	10,55	1,74	2,29
5	5,40	9,69	1,79	2,23
6	5,45	9,77	1,79	2,23
7	5,40	9,56	1,77	2,24
8	5,40	9,28	1,72	2,27
9	5,40	9,32	1,73	2,27
10	6,05	10,46	1,73	2,30

Desvios dados pelo erro padrão da média

Sulfato Ferroso misturado com Óxido de Zinco (SF + OZn), Sulfato Ferroso
 Misturado com Óxido de Magnésio (SF + OMg) e Sulfato Ferroso (SF).

Valores Médios: SF + OZn = $0,58 \pm 0,03$, SF + OMg = $0,03 \pm 0,01$ e
 SF = $25,65 \pm 0,05$

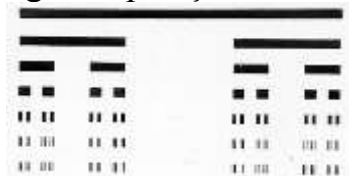
Amostra	SF + OZn	SF + OMg	SF
1	0,587	0,026	25,60
2	0,693	0,024	25,81
3	0,507	0,033	25,60
4	0,587	0,025	25,60
5	0,693	0,028	
6	0,443	0,028	
7	0,587	0,029	
8	0,56	0,027	

Desvios dados pelo erro padrão da média

Apêndice 2: Modelos clássicos de fractais

Poeira de Cantor $D \approx 0,63$

Nível 1 é a segunda posição de cima para baixo.

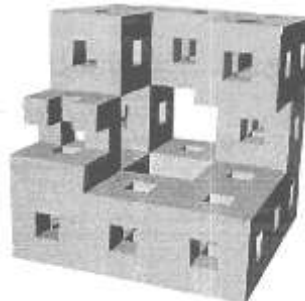


Carpete de Sierpinsky $D \approx 1,89$

Nível 1 é a primeira figura da esquerda.



Esponja de Menger em formação



Esponja de Menger $D \approx 2,73$

Modelo para materiais porosos

