

EPUSP - ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia Mecânica

PMC 580 - Projeto Mecânico

Análise de Secadores Rotativos para Secagem de Argilas Bentoníticas

Orientador

Prof. Dr. Otávio de Mattos Silveiras

Birk Reibel

NºUSP 2707821

Francisco José Pereira Leite

NºUSP 2807020

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	4
1. INTRODUÇÃO	5
2. A EMPRESA BENTONIT UNIÃO DO NORDESTE.....	5
3. DESCRIÇÃO E PROPRIEDADES DA BENTONITA	6
A. Descrição da Bentonita.....	6
B. Estrutura Cristalina da Bentonita	7
C. Propriedades da Bentonita.....	10
C1. Tixotropia	10
C2. Plasticidade.....	10
C3. Floculação e Agregação	11
C4. Viscosidade de Dispersões Coloidais de Bentonita.....	12
4. USOS INDUSTRIAS DA BENTONITA.....	12
A. Perfuração de Poços Petrolíferos	12
B. Pelotização de Minérios de Ferro	15
C. Fundição.....	18
D. Construção Civil.....	19
E. Perfuração de Poços Artesianos	20
F. Tintas	20
G. Rações de Gado	21
H. Fabricação de Cerâmicas.....	21
I. Clarificação de Vinhos e Águas Turvas	21
5. DESCRIÇÃO DO PROCESSO INDUSTRIAL	21
A. Mineração	21
B. Estocagem.....	22
C. Ativação	23
D. Secagem	23
E. Moagem	25
F. Ensacamento	25
G. Transporte	25
6. ANÁLISE DOS CUSTOS DO PROCESSO DE SECAGEM	26

A. Custos de Combustível	26
B. Custo de Mão de Obra	27
C. Custo de Manutenção	27
D. Custo da Pá Carregadeira	27
E. Custo de Energia Elétrica	28
F. Amortização do Equipamento	29
F1. Custo de Aquisição	29
F2. Vida Útil do Equipamento	29
F3. Cálculo do Custo de Amortização	29
G. Custo Total do Processo de Secagem	30
7. PROCESSO DE SECAGEM	30
A. Introdução	30
B. Equipamentos de Secagem	30
C. Secadores Rotativos	31
8. PRINCÍPIOS DE SECAGEM	32
A. Umidade de Equilíbrio e Umidade Livre	32
B. Água Ligada e Água Livre	33
C. Taxa de Secagem	34
C1. Transferência de Calor nos Secadores	34
C2. Mecanismo de Secagem dos Sólidos	34
C3. Curva de Taxa de Secagem	35
D. Secagem de Sólidos Porosos e Fluxo de Água por Capilaridade	36
E. Cálculo do Tempo de Secagem	37
F. Secagem de Materiais Higroscópicos	37
9. TEMPO DE RETENÇÃO	37
A. Introdução	37
B. Tempo de Retenção - Determinação da Equação	38
B.1 Equação de Transporte de uma Única Partícula	38
B.2. Distribuição de velocidades através do cilindro	42
B.3. Distribuição Uniforme	43
C. Equação Empírica para Determinação do Tempo de Retenção	44
D. Conclusão - críticas aos modelos utilizados	44

10. CÁLCULO DA UMIDADE RELATIVA DO MATERIAL ATRAVÉS DO CILINDRO.....	46
11. SECAGEM ATRAVÉS DE MICROONDAS.....	50
A. Introdução.....	50
B. O Processo de Aquecimento.....	51
C. O Processo de Secagem.....	52
D. Equipamento Utilizado no Aquecimento dielétrico.....	52
12. SECAGEM DE ARGILAS BENTONÍICAS ATRAVÉS DE MICROONDAS.....	54
A. Ensaio de Secagem de Bentonita por Microondas.....	54
B. Metodologia para Comparação de Resultados.....	55
C. Metodologia do Ensaio de Secagem por Microondas.....	55
D. Resultados da Secagem por Microondas.....	57
D1. Custos Envolvidos no Processo.....	59
D2. Qualidade da Argila Obtida.....	59
13. ANÁLISES E CONCLUSÕES DO TRABALHO.....	62
14. BIBLIOGRAFIA.....	68
A. Artigos.....	68
B. Livros.....	68
ANEXO I - CÁLCULOS - BALANÇO DE MASSA E BALANÇO TÉRMICO.....	70
ANEXO II - CÁLCULOS RELATIVOS À UMIDADE NA SAÍDA DO CILINDRO.....	73
ANEXO III - METODOLOGIAS DE TESTE DE PROPRIEDADES DAS ARGILAS.....	78
A. Método de Determinação do Teor de Umidade de Recebimento de Bentonita.....	78
B. Método de Determinação do Poder de Inchamento de Bentonita.....	79
C. Método de Determinação da Granulometria # + 200 Mesh em Bentonita.....	80
D. Método de Determinação da Adsorção de Azul de Metileno em Bentonita.....	82
E. Ensaio de Argila Ativada para Fluido Doce de Perfuração à Base de Água Doce.....	84

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Prof. Otávio de Mattos Silveiras, pela orientação, pelas discussões, idéias e sugestões que possibilitaram a realização deste trabalho.

Agradecemos também a Alexandre R. Zandonadi e Maria Eugênia de Palva Souza, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, ao Prof. José Thomaz Senise e a Artur Selmikaitis, do Instituto Mauá de Tecnologia, e a Thomas Richter e Henri Favre, da empresa Bentonit União do Nordeste, pelas informações e auxílios prestados para o desenvolvimento deste trabalho.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo a redução dos custos de produção de bentonita, uma argila de largo emprego na indústria, com aplicações tão variadas como fundição e perfuração de poços de petróleo.

A extração e preparação da argila bentonítica, para utilização envolve uma série de etapas e custos de diferentes naturezas. No entanto, conforme nos foi dito pela própria empresa, e conforme será mostrado mais à frente, os principais custos operacionais derivam do processo de secagem da argila.

Tal processo precede, necessariamente, o processo de moagem para obtenção de argilas com granulações diversas, conforme a aplicação industrial.

A redução dos custos de secagem é a discussão central desse trabalho.

O tema parece-nos interessante pois um conhecimento maior do funcionamento do processo industrial de secagem permitir-nos-á adquirir conhecimentos importantes em área de nosso interesse profissional.

2. A EMPRESA BENTONIT UNIÃO DO NORDESTE

A Bentonit União do Nordeste S.A. (BUN) foi fundada em 1965, quando toda a bentonita necessária ao consumo brasileiro era importada.

A argila bentonítica foi encontrada pela primeira vez em 1963, no interior do Estado da Paraíba, o que possibilitou o início das atividades da empresa.

A demanda cada vez maior do mercado e a necessidade do desenvolvimento de uma tecnologia nacional levaram a BUN, em 1968, a buscar o know-how da Sud-Chemie AG., da Alemanha.

Assim, a construção da primeira fábrica, em Campina Grande, só foi possível graças ao fornecimento de tecnologia por parte da Sud-Chemie AG. e aos incentivos da SUDENE.

Atualmente, a empresa conta com uma fábrica na região de Boa Vista, que está substituindo a fábrica de Campina Grande, e duas filiais, uma em João Pessoa e outra em Salvador.

A empresa possui ainda um escritório central em São Paulo, pois a região Sudeste, importante pólo industrial da América Latina, é o principal centro consumidor de bentonita.

3. DESCRIÇÃO E PROPRIEDADES DA BENTONITA

A. Descrição da Bentonita

O nome bentonita foi aplicado pela primeira vez, em 1898, a uma argila plástica coloidal encontrada em camadas cretáceas em Wyoming, Estados Unidos. Esta argila apresentava as propriedades específicas de aumentar várias vezes de volume, em relação ao seu volume inicial, se umedecida com água, e de formar géis tixotrópicos em meio aquoso, em baixas concentrações, próximas de 2%.

Segundo Ross e Shannon, bentonita "é uma rocha constituída, essencialmente, por um argilomineral montmorilonítico formado pela desvitrificação e subsequente alteração química de um material vítreo, de origem ígnea, usualmente um tufo ou cinza vulcânica". Essa definição está diretamente correlacionada com a formação geológica da argila e não tendo relação direta com as suas propriedades fisicoquímicas e tecnológicas.

As propriedades peculiares da bentonita de Wyoming e regiões vizinhas de mesma formação geológica decorrem do fato de que seu argilomineral constituinte é a montmorilonita sódica, como consequência do depósito de cinzas ácidas em ambiente úmido, que contém pequenas quantidades de cálcio e magnésio e é rico em cloreto de sódio. O cátion adsorvido em maior quantidade na estrutura montmorilonítica foi, portanto, o sódio. A bentonita cálcica de Mississippi é também uma bentonita verdadeira mas seu argilomineral constituinte é a montmorilonita cálcica, o que altera as propriedades fisicoquímicas da argila.

Em países onde não existe a montmorilonita sódica natural, de grande emprego industrial, como é o caso do Brasil, é prática usual tratar uma montmorilonita cálcica com carbonato de sódio, ou mesmo cloreto de sódio, e assim obter uma montmorilonita sódica de propriedades tecnológicas iguais ou próximas às da bentonita sódica do Wyoming.

A existência desses dois tipos de argilas montmoriloníticas, a sódica e a cálcica, permite sua subdivisão de acordo com maior ou menor grau de hidratação dos cátions.

A primeira subdivisão é a das bentonitas que aumentam de volume. São constituídas pelo argilomineral montmorilonítico sódico, cujo cátion adsorvido predominante é o sódio. Expostas à umidade atmosférica, as bentonitas sódicas adsorvem água, apenas o correspondente a uma camada monomolecular de água em torno de cada partícula. Em meio aquoso a bentonita sódica adsorve várias camadas de moléculas de água aumentando de volume, a menos que fique confinada em um espaço limitado ou que a quantidade de água disponível seja reduzida.

Essa adsorção de água de modo contínuo, pela bentonita sódica, provoca um desfolhamento individualizado das partículas até completa dispersão em água, proporcionando à bentonita sódica os seus usos tecnológicos específicos ou exclusivos típicos e característicos.

A segunda subdivisão é a das bentonitas que não aumentam de volume. São constituídas pelo argilomineral montmorilonítico cálcico, cujo cátion adsorvido predominante é o cálcio. Expostas à umidade atmosférica, adsorvem água até uma quantidade correspondente a três camadas moleculares; em meio aquoso, a adsorção de mais camadas de moléculas de água não ocorre e, portanto, o inchamento é pequeno e as partículas se depositam (precipitam ou floculam) rapidamente. Essas argilas são largamente usadas como aglomerante de areia de fundição.

B. Estrutura Cristalina da Bentonita

Os grupos fundamentais, com base nos quais são construídos todos os tipos de estruturas cristalinas dos argilominerais conhecidos, são grupos tetraédricos e octaédricos de átomos ou íons de oxigênio e de íons hidroxila, ao redor de pequenos cátions. Nos grupos tetraédricos esses cátions são o silício e o alumínio, ocasionalmente ferro, e nos grupos octaédricos, os cátions são o alumínio, o magnésio, o ferro e o titânio, e ocasionalmente, cromo, molibdênio, zinco e lítio.

No caso da bentonita, as estruturas tetraédricas são compostas por átomos de oxigênio ao redor de um átomo de silício, como podemos observar na figura 1. A estrutura octaédrica é formada por um átomo de alumínio, envolvido por átomos de oxigênio e íons hidroxila, como podemos observar na figura 2.

Na figura 3, vemos que a estrutura da bentonita é constituída por duas folhas de silicato tetraédricas, envolvendo uma folha central octaédrica de aluminato, unidas entre si por oxigênios comuns.

Pode haver substituições isomórficas em porcentagens moderadas, até cerca de 15%, de alumínio por silício nas posições tetraédricas. As populações das posições octaédricas podem ser compostas, principalmente, por alumínio, ferro e magnésio, isoladamente ou em combinação.

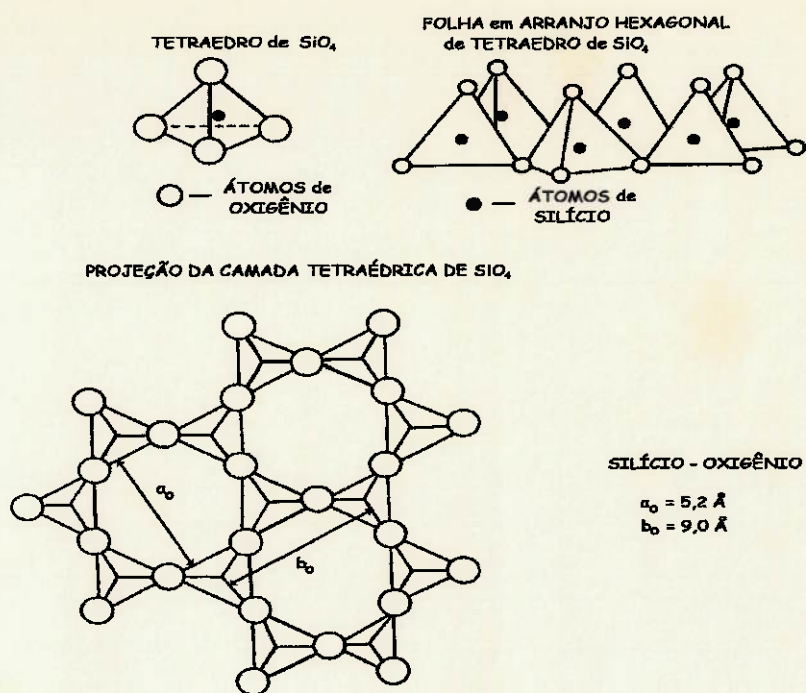


FIGURA 1 - Estrutura dos Tetraedros de Silício

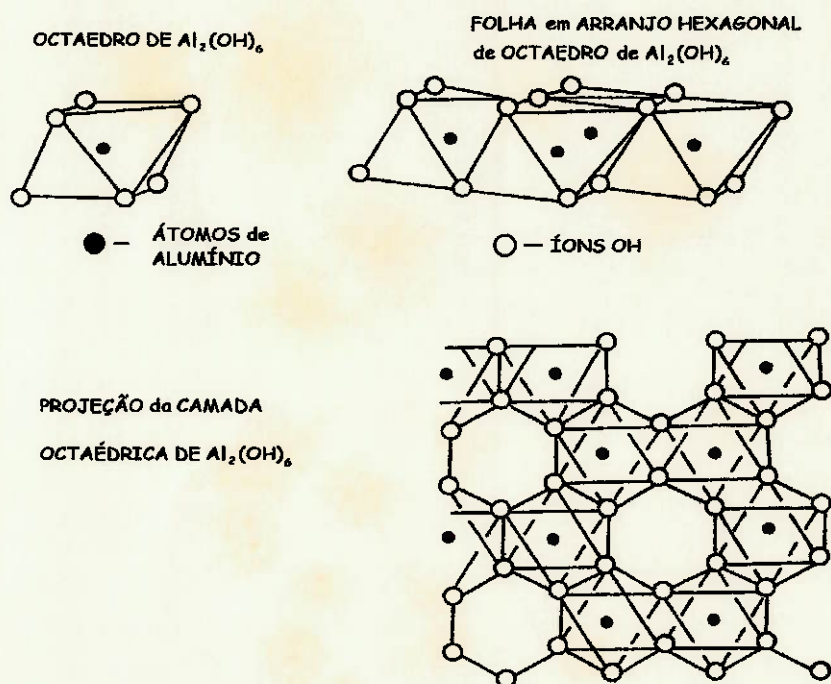


FIGURA 2 - Estrutura dos Octaedros de Alumínio

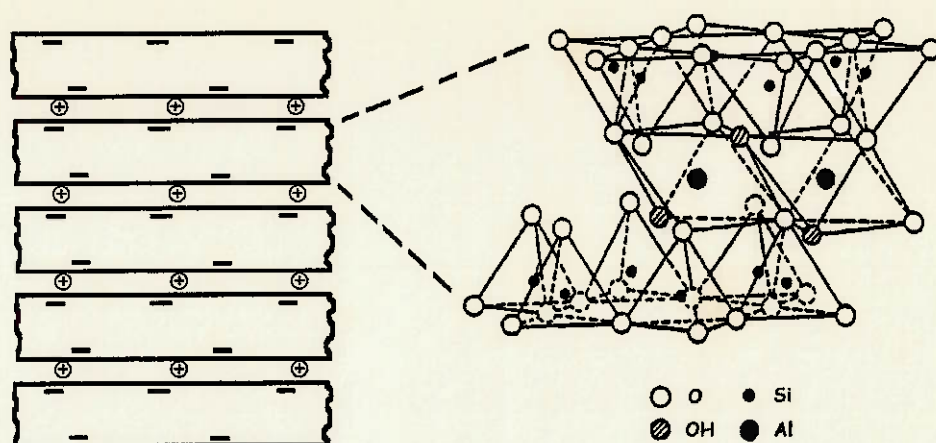


FIGURA 3 - Estrutura da Bentonita

Todas as posições octaédricas ou somente dois terços delas podem estar preenchidas. A quantidade das posições catiônicas é tal que as camadas estão desequilibradas eletricamente, com uma deficiência de cargas positivas de cerca de 0.66 cátions monovalentes por cela unitária, deficiência essa que é equilibrada, principalmente, por cátions hidratados entre as camadas estruturais. Os cátions neutralizantes não estão fixados irreversivelmente e podem ser trocados por outros cátions. Tal troca depende da concentração e do potencial elétrico de ambos os cátions envolvidos.

As camadas sucessivas estão ligadas frouxamente entre si e camadas de água ou de moléculas polares, de espessuras variáveis, podem entrar entre elas, quando argilominerais montmoriloníticos anidros são colocados em água ou em ambientes úmidos, ocasionando uma separação entre as camadas do argilomineral, separação que pode ser total, deixando-as livres, quando as distâncias interplanares ficam superiores a 40Å.

Essa entrada de água entre as folhas faz com que o espaçamento basal aumente e, nessas condições, os cátions interlamelares são suscetíveis de serem trocados por outros cátions por uma reação química estequiométrica. É através desse processo que podemos obter uma argila montmorilonítica sódica, a partir de uma argila montmorilonítica cálcica.

C. Propriedades da Bentonita

C1. Tixotropia

A tixotropia é uma das mais importantes propriedades das argilas bentoníticas. É dela que derivam todas as outras propriedades deste tipo de argila e é ela que possibilita sua grande gama de aplicações industriais.

Dispersões coloidais diluídas de bentonitas sódicas, com placas largas e muito finas, semelhantes a fibras muito longas, apresentam o fenômeno da tixotropia. A suspensão torna-se menos rígida e viscosa pela agitação (sol) e mais espessa pelo repouso (gel). Define-se a tixotropia como a transformação sol-gel isotérmica reversível.

Este fenômeno se deve ao desbalanceamento de cargas existentes entre as folhas de tetraedros de silício e as folhas de octaedro de alumínio. Nas superfícies superiores e inferiores, há um desbalanceamento de cargas devido à presença de átomos de oxigênio, ligados aos átomos de silício, formando o tetraedro. Isto faz com que tenhamos carga elétrica negativa ao longo destas duas superfícies. Nas superfícies laterais ocorre o contrário pois a presença de íons positivos fortemente polarizantes, como o alumínio e o silício, faz com que tenham cargas positivas.

Este tipo de desequilíbrio faz com que haja uma atração fraca entre as laterais de uma estrutura e as superfícies das outras estruturas ocasionando uma interação face-a-aresta.

Desta forma, quando a dispersão está em repouso, este tipo de atração desloca algumas estruturas que ficam perpendiculares às outras. Isto faz com que tenhamos uma estrutura semelhante a um "castelo de cartas", o que mantém a argila mais viscosa.

Esta estrutura muito frágil, com ligações fracas, e se desfaz com agitação, fazendo com que a solução volte a ter uma baixa viscosidade.

C2. Plasticidade

Plasticidade é a propriedade que um sistema possui de se deformar pela aplicação de uma força e de manter essa deformação quando a força aplicada é retirada. Se o sistema argila + água não fosse plástico, não seria possível fazer tijolos por extrusão.

Argilas, em geral, desenvolvem plasticidade quando são misturadas com uma quantidade de água relativamente pequena. Quando a água é adicionada à argila seca em sucessivos acréscimos, a argila tende, em geral, a ficar relativamente trabalhável, ou seja, moldável, sem

que haja ruptura. A trabalhabilidade e a capacidade de manter a forma é possível apenas dentro de uma pequena faixa de umidade. A adição de água acima de um determinado limite, amolece demais a argila, não permitindo que ela conserve a sua forma e aproximando seu comportamento de um fluido.

Plasticidade em argilas é essencialmente resultante das forças de atração entre partículas de argilominerais e a ação lubrificante da água entre as partículas anisométricas lamelares. Pode-se admitir que a plasticidade se desenvolve quando a argila tem água suficiente para cobrir toda a superfície acessível dos argilominerais com uma película de "água rígida", isto é, a água que está entre dois tetraedros de silício na estrutura do argilomineral. Embora essa água não seja sólida, ela é fortemente orientada devido às forças elétricas presentes. Existe, juntamente com esta água rígida, um pouco de água líquida, isto é, não orientada, que age como meio lubrificante facilitando o deslizamento das placas umas sobre as outras, quando uma tensão tangencial for aplicada.

Este fato significa que a água age não somente como um meio inerte, para separar as partículas dos argilominerais, mas também tem um papel muito ativo na propriedade de plasticidade. Como as moléculas de água orientada estão presas na superfície dos argilominerais por ligações de hidrogênio, elas também servem para ligar as partículas de argilominerais entre si, na forma úmida (a verde) da argila, dando origem às várias formas da sua resistência mecânica a verde.

C3. Flocculação e Agregação

Quando um argilomineral é disperso ou defloculado em água, por exemplo por meio de um agente dispersante ou defloculante como o hidróxido de sódio, o íon Na^+ fica em solução e a superfície do argilomineral fica com uma carga negativa adsorvida (íons OH^-). As partículas de argila funcionam como condensadores elétricos carregados, e a repulsão entre elas provoca a dispersão no meio, dando origem a um sol coloidal, geralmente muito viscoso. Aumentando a carga positiva dos íons do meio, por exemplo, adicionando Ca^{2+} ou Mg^{2+} , o potencial eletrocinético da partícula do argilomineral diminui, a repulsão entre as partículas diminui e há formação de aglomerados de partículas, que sedimentam sob ação da própria massa, no fenômeno de precipitação ou flocculação.

C4. Viscosidade de Dispersões Coloidais de Bentonita

A viscosidade depende dos seguintes fatores:

- a. Viscosidade do líquido dispersante;
- b. Concentração da fase dispersa;
- c. Dimensões e forma da partículas dispersas;
- d. Forças de interação entre as partículas, isto é, o estado de estabilidade da suspensão;
- e. Grau de agitação da dispersão.

4. USOS INDUSTRIAS DA BENTONITA

Os principais usos industriais da bentonita são os seguintes:

A. Perfuração de Poços Petrolíferos

Os primeiros poços de petróleo foram abertos por sondas de percussão com as quais a maior profundidade atingida foi de 2000 metros. A introdução das sondas rotativas, de início, encontrou dificuldades de lubrificação e resfriamento da broca e do eixo; de umidificação do solo em perfuração; de desmoronamento de paredes; de infiltração de água e gases; de freagem do sonda por causa do acúmulo de detritos da perfuração. Atualmente, com sondagens superiores a 6000 metros de profundidade, a preparação e o emprego de fluídos de perfuração são um campo especializado e extremamente importante na indústria de extração do petróleo.

O fluído ou lama injetado nas sondas rotativas é uma mistura de água com bentonita que permanece em suspensão durante tempo considerável. Consta, portanto, de fase dispersa (bentonita mais partículas densas para aumentar a massa específica do fluído) e fase dispersante (água). Contém ainda outras partículas sólidas (areia, mica, carbonatos) e diversos sais em solução, de acordo com a natureza da argila e da água usadas. O comportamento e as propriedades da lama dependem, pois, da dimensão e da natureza das partículas da fase dispersa, da carga elétrica dessas partículas, da quantidade de água e da natureza dos sais dissolvidos. A dispersão coloidal assim formada, além de permitir tratamentos químicos e realização de medidas elétricas para a determinação da porosidade e permeabilidade dos solos perfurados, deve apresentar determinada viscosidade aparente e uma apreciável tixotropia para

manter em suspensão, nas interrupções de funcionamento, os detritos da perfuração e as partículas inertes da própria fase dispersa. Deve, também:

- a. Lubrificar e esfriar a broca e hastes de perfuração
- b. Transportar consigo, para a superfície, os detritos da perfuração
- c. Vedar as paredes do poço evitando a perda de água
- d. Manter a pressão adequada para evitar erupções e desmoronamento
- e. Ser de fácil bombeamento
- f. Não ser corrosiva e nem abrasiva
- g. Não inundar a ocorrência de petróleo

É a bentonita dispersa que dá ao fluido de perfuração essas propriedades: ela deve ter composição química e estrutura cristalina específica para que possa apresentar tais propriedades.

Uma das funções que a lama deve realizar durante a perfuração é exercer pressão sobre as paredes tanto para evitar desmoronamento quanto para impedir que a água encontrada nas perfurações penetre no poço. Além disso, impermeabilizando as paredes do poço, a perda de fluido de perfuração é reduzida. A pressão exercida pela coluna de lama sobre as paredes do poço tende a forçar a penetração da lama nas camadas perfuráveis. Como a água penetra mais facilmente nos poros das camadas, as partículas de bentonita são retidas formando uma camada fina ou parede de filtração, cuja espessura aumenta enquanto a lama ceder água às rochas com as quais está em contato. A parede de filtração se torna impermeável ao alcançar determinada espessura, calafeta as paredes e impede perdas de água por infiltração nas paredes do poço. A parede de filtração protege as paredes do poço até ser introduzida a coluna de tubulação metálica. Sobre esta parede de filtração agem a pressão hidrostática da coluna de lama e a pressão exercida pelas camadas perfuradas. Quando essas duas forças entram em equilíbrio, a parede de filtração se torna consistente permitindo o desenvolvimento normal da perfuração. Admite-se que a pressão exercida pelas camadas perfuradas é igual à pressão hidrostática do fluido de perfuração. Esta pode ser controlada, já que depende da massa específica da suspensão aquosa da argila e é diretamente proporcional à massa específica e à altura da coluna de fluido de perfuração. Daí a importância do controle da massa específica real do fluido, a qual tende a aumentar ou diminuir durante a perfuração das camadas rochosas, arenosas e semifluídas.

Os valores da massa específica podem variar de 1 a 2 g/cm³.

Quando agitada a lama tixotrópica se comporta como um sol e quando é retirada do poço, traz consigo as partículas trituradas de rocha. Na superfície, a lama é recolhida em um tanque onde as partículas sólidas se depositam. Quando em repouso ou sem agitação da coluna de agitação, os sistemas argila-água adquire propriedades de gel, mantendo em suspensão tanto as partículas inertes como os detritos da trituração das rochas.

A lama se compõe de três partes: fase líquida (água), uma fração coloidal e fração inerte (areia, baritina e outros minerais densos). A fração principal, da qual dependem as propriedades desejadas comercialmente, é a coloidal que pode ser aumentada ou diminuída com a introdução de bentonitas e outras argilas. Esta fração coloidal pode ser, também, ser melhorada por tratamento químico ou deteriorada por contaminação.

A quantidade de sólido que pode ser misturada à água para fazer uma lama bombeável depende do grau de hidratação e solvatação das partículas sólidas e do seu tamanho. Se o material a ser usado for altamente coloidal, como a bentonita sódica, então, de 7% a 9% de sólidos serão o máximo que poderá ser tolerado em tratamentos químicos. Diz-se que essa argila tem alto rendimento.

O rendimento de uma argila para fins de utilização em fluídos de perfuração rotativa, é definido como o número de metros cúbicos de lama, com 15 cP de viscosidade aparente, que podem ser preparados com uma tonelada de argila.

De acordo com o rendimento, as argilas são classificadas, pela Petrobrás, segundo três grupos:

a. Argilas de Alto Rendimento: são capazes de fornecer de 12.5 a 17 m³ de lama com 15 cP de viscosidade aparente por tonelada de argila seca pulverizada.

b. Argilas de Médio Rendimento: são capazes de fornecer de 6 a 12.5 m³ de lama com 15 cP de viscosidade aparente por tonelada de argila seca pulverizada.

c. Argilas de Baixo Rendimento: são capazes de fornecer menos de 6 m³ de lama com 15 cP de viscosidade aparente por tonelada de argila seca pulverizada.

As características dos fluídos de perfuração, que são determinadas e medidas em ensaios de laboratórios constam abaixo, seguidas de suas especificações. As especificações para essas características se encontram nas normas da Petrobrás (1968), as quais estão baseadas nas normas romenas e do American Petroleum Institute e são as seguintes:

a. Massa Específica: entre 1 e 2 g/cm³

b. Resistência Inicial do Gel: máximo 7 gf/cm² para argilas de alto rendimento e 10 gf/cm² para argilas de médio rendimento.

c. Resistência Final do Gel: máximo 13 gf/cm² para argilas de alto rendimento e 20 gf/cm² para argilas de médio rendimento.

d. Limite de Escoamento: 2 a 7 gf/cm² para argilas de alto rendimento, e de 4 a 10.5 gf/cm² para argilas de médio rendimento.

e. Volume do Filtrado: máximo de 14 ml para argilas de alto rendimento e 16 ml para argilas de médio rendimento.

f. Viscosidade Aparente: mínimo de 15 cP numa suspensão a 6%.

g. Viscosidade Plástica: diferença entre a viscosidade aparente medida a 600 rpm e a 300 rpm. O valor mínimo é de 8 cP numa suspensão a 6%.

h. Rendimento máximo: conforme citado acima. A Petrobrás costuma usar argilas com alto e médio rendimento, apenas.

i. pH: Normalmente o pH do fluido deve estar entre 7 e 9. Conforme certas condições, o pH pode ou deve chegar a 11.

B. Pelotização de Minérios de Ferro

Mesmo antes da Segunda Guerra Mundial, devido ao esgotamento dos minérios de ferro de alto teor, as usinas siderúrgicas norte-americanas começaram a importar minério de ferro do Canadá, Brasil, Europa, Ásia e África. Em 1960, a importação de minério de ferro era de 36 milhões de toneladas/ano, representando cerca de 35% das necessidades normais do país. A taconita, minério de ferro de baixo teor do distrito do Lago Superior dos EUA, após moagem adequada, pode liberar finos capazes de produzir 20 bilhões de toneladas de concentrado contendo 64% de concentrado de ferro, o que é suficiente para os próximos dois séculos.

Durante anos foram desenvolvidos métodos técnicos e economicamente adequados para moer, separar e concentrar o minério de ferro finamente dividido. Vários métodos de compactação foram experimentados, sendo os mais importantes a sinterização e a modulização. Porém era necessário uma melhor resistência mecânica do minério aglomerado. Com a adição de bentonita sódica em 1943, foram conseguidas as primeiras pelotas (*pellets*), a partir dos finos de magnetita separados da taconita.

O processo de pelletização consiste na aglomeração de finos de minério de ferro em pelotas, com características adequadas para uso em processos siderúrgicos de redução. Neste processo, o aglomerante é um aditivo de grande importância, influenciando diretamente na qualidade do produto e nos rendimentos operacionais dos diversos setores da produção.

O processo tem início na moagem por via úmida que é feita em moinhos de bolas, operando em circuitos fechados com hidrociclones para classificação. O produto final da moagem é a polpa com cerca de 80% de água e 20% de sólidos. Na polpa, 95% do minério em suspensão tem granulometria abaixo de 0.044 mm (325#), correspondendo a uma superfície específica da ordem de 1800 cm²/g.

A polpa é bombeada para um espessador onde é feita a recuperação da água do processo, com consequente adensamento e elevação do teor de sólidos para 70 %. Posteriormente é mantida sob agitação em tanques homogeneizadores, antes de ser enviadas para a filtragem.

A filtragem da polpa é feita em filtros de discos verticais e o teor de água é reduzido para 9%. Na polpa retida, após filtragem, é adicionado o aglomerante para início da fase do pelletamento. A configuração esférica é conseguida, no pelletamento, através de discos giratórios, nos quais as pelotas se formam por rolamentos das partículas de minério uma sobre as outras. Esse fenômeno e as características físicas da pelota formada dependem da inclinação e da rotação do disco de pelletamento, da quantidade específica e capacidade de aglutinação do aglomerante na polpa e das características do minério, como superfície específica e umidade, entre outras. As pelotas formadas nesta fase são designadas pelotas cruas. Aí, o aglomerante tem papel importante, conferindo às pelotas cruas a resistência necessária ao tratamento posterior, o que é impossível de se conseguir apenas com ação isolada da água.

As pelotas cruas são transportadas até o forno para tratamento térmico, sendo submetidas a quedas sucessivas, peneiramento e esforços mecânicos, daí a importância do aglomerante.

A queima das pelotas cruas é o último estágio do processo de pelletização.

As pelotas cruas são transportadas para o forno de grelha para que seja feito um pré-aquecimento, onde as pelotas passam por fases de secagem, nas quais as temperaturas variam de 300 a 900 °C. Nessas fases as pelotas cruas sofrem sollicitações térmicas, devendo o aglomerante conferir-lhes as seguintes características:

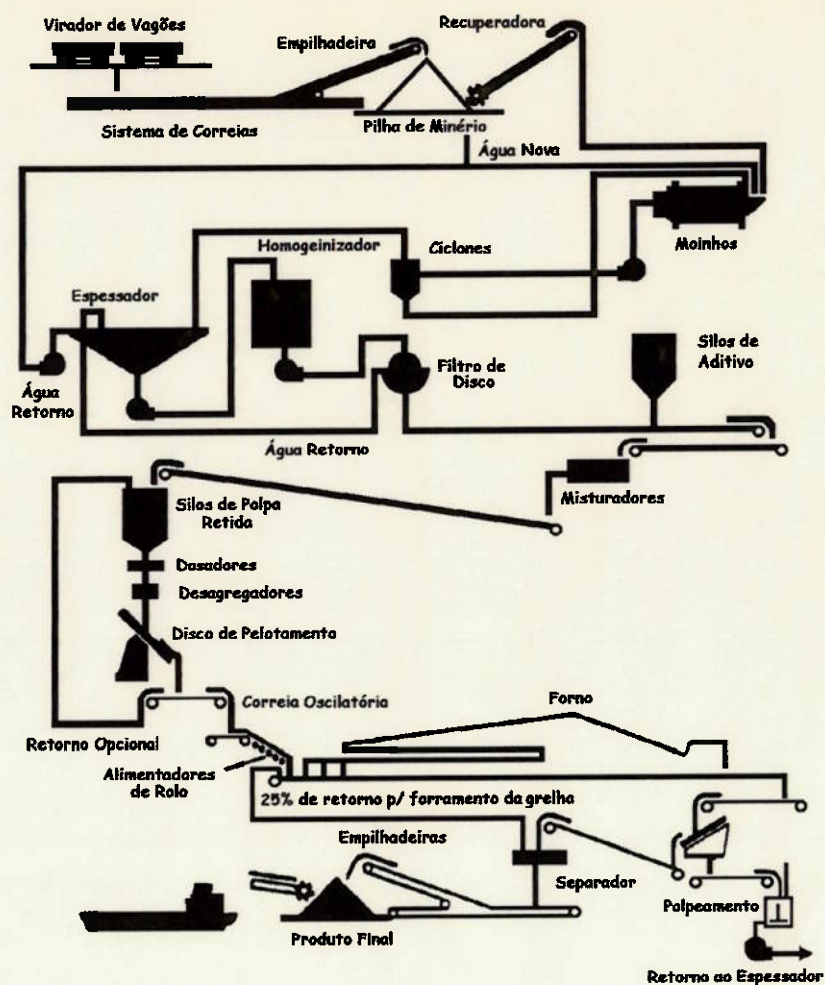


FIGURA 4 - Fluxograma de Pelotização "Vale do Rio Doce"

a. Resistência ao Choque Térmico: a brusca evaporação da água contida nos poros das pelotas cruas cria pressões internas que acarretarão trincas ou mesmo desintegração das pelotas.

b. Resistência à Compressão: as camadas inferiores das pelotas, na grelha, sofrem a ação das camadas superiores, bem como pressões dos gases quentes.

Após o pré-aquecimento, as pelotas sofrem um tratamento final de queima, no qual a temperatura final chega a 350 °C. São resfriadas, peneiradas, estocadas e, finalmente, embarcadas para os fornecedores com a qualidade requerida nos processos siderúrgicos.

Há anos, a Companhia Vale do Rio Doce vem estudando aglomerantes sintéticos como substitutos potenciais da bentonita. Embora estes materiais apresentem vantagens sobre a bentonita no tocante a incorporação de impurezas às pelotas, tais como óxido de silício (SiO_2)

e óxido de alumínio (Al_2O_3) e menor movimentação de cargas, há limitantes a uma maior utilização. Os preços desses materiais têm inviabilizado a sua maior disseminação no Brasil, para propósitos da pelletização de minério de ferro, não se conseguindo relações custo-benefício motivadoras.

C. Fundição

Dentre as muitas aplicações tecnológicas de argilas, uma das mais importantes é na indústria metalúrgica, especialmente em fundição, para conformação (moldagem) em areia. Uma areia de fundição é um material heterogêneo, constituído essencialmente por um elemento granular refratário, dito areia-base (geralmente areia silicosa), e por um elemento aglomerante, seja mineral (argila-base) ou orgânico (óleos ou aglomerantes derivados de cereais e resinas sintéticas), usado para confecção de moldes monolíticos de fundição, designados mais comumente como moldes refratários.

A argila, aglomerante do tipo mineral, utilizada em fundição deve ter alto poder aglomerante de modo que a areia de fundição tenha elevada resistência mecânica a verde, depois de secada, e a quente, isto é, em temperaturas da ordem de 800°C , para suportar o jato de metal fundido e a ação do metal e da escória, se existir, durante o resfriamento.

Existe uma série de requisitos que devem ser preenchidos pelas argilas de fundição para que elas possam ser empregadas. Na tabela 1, temos uma comparação entre três tipos de argilas, incluindo a bentonita (argila montmorilonítica sódica), mostrando quais dos requisitos são preenchidos por ela.

Verifica-se no resumo apresentado que, embora a bentonita apresente melhores requisitos tecnológicos, especialmente quanto a maior resiliência, maior permeabilidade e menor umidade, ela é deficiente em relação a outros itens que afetam a economia de operação industrial: durabilidade, que reflete no consumo relativo de argila a adicionar na areia recuperada; escoabilidade que afeta o trabalho de socamento do molde; número de torrões, que está ligado ao serviço de desmoldagem e peneiramento da areia.

O custo final da areia em serviço não é composto somente pelo custo inicial da matéria-prima, mas também pelo custo desses fatores ligados à manutenção da areia, tais como custos de durabilidade, escoabilidade e formação de torrões, bem como da incidência de defeito nas peças fundidas e no acabamento superficial das mesmas.

Requisitos Desejáveis para Areias de Fundição	Ordem de Preferência dos Argilominerais		
	1º	2º	3º
Maior Resistência à Compressão da Areia Verde	M	I	C
Maior Resistência à Compressão da Areia Seca	M	C	I
Maior Permeabilidade	M	I	C
Menor Umidade	M	I	C
Maior Ponto de Sinterização	C	M	I
Maior Durabilidade	C	M	I
Maior Escoabilidade	I	C	M
Maior Colapsibilidade	I	C	M
Maior Resiliência	M	C	I
Menor Contração	C	M	I
Menor Número de Torrões de Moldagem	I	C	M
Menor Trabalho de Mistura	I	M	C

M. Argila Montmorilonítica Sódica

I. Argila Ilítica

C. Argila Caulinítica

TABELA 1 - Requisitos Desejáveis para Areias de Fundição

As bentonita sódicas são usadas como ligantes quando se deseja uma maior resistência a seco e a quente, enquanto a bentonita cálcica é usada quando a colapsibilidade elevada é mais importante do que a resistência a seco e a quente. Em alguns casos, é comum utilizar uma mistura dos dois tipos de bentonita.

D. Construção Civil

As dispersões de montmorilonitas sódicas podem, por filtração em superfícies, formar uma parede de argila altamente hidratada que é impermeável à passagem de água. Essa propriedade, usada em fluídos de perfuração de poços de petróleo, pode ser usada em engenharia civil para a obtenção de "paredes" e diafragmas que servem para impermeabilizar o fundo de lagos e de canais, e para proteger estruturas de concreto contra a penetração de água e fluídos agressivos, como as águas agressivas nas paredes do metrô, em São Paulo. É usual a in-

jeção de barbotinas de bentonita sódica em fissuras, em maciços rochosos e barragens de terra e de concreto visando a formação de géis tixotrópicos que se solidificam e vedam o fluxo de água, obviamente com posterior de cimento. A passagem para montmorilonitas cálcicas, tal como nos poços de petróleo, pode aumentar a perda de água pelo aumento de permeabilidade devido à floculação causada pelo cátion cálcio.

Outro problema em engenharia civil é a "pressão de expansão" apresentada em solos e rochas secas, ricos em argilominerais montmoriloníticos, quando umedecidos com água. Em uma argila montmorilonítica seca, a distância interplanar basal é de 14 Å, qualquer que seja o cátion trocável. Assim, as moléculas de água, penetrando entre as folhas basais separam-nas, aumentando a distância interplanar até cerca de 20 Å até 22 Å e a valores maiores, se for sódio o cátion trocado. Com isso há o inchamento da montmorilonita, a qual aumenta de volume; e se o inchamento for livre, isto é, se houver água suficiente, as folhas de montmorilonita se dispersarão, dando gel viscoso ou gel tixotrópico. Entretanto, se o inchamento for restringido, isto é, confinando a bentonita em expansão com a membrana flexível, uma pressão apreciável poderá ser medida: é a pressão de expansão, que pode provocar acidentes graves tais como fendas em paredes e escorregamento de taludes.

E. Perfuração de Poços Artesianos

Esta utilização é semelhante à utilização de bentonita em perfuração de poços de petróleo e impermeabilização na construção civil.

As dispersões de montmorilonitas sódicas, quando altamente hidratadas, formam paredes de argila que impedem a passagem de água. Esta propriedade é utilizada para impermeabilizar a parede do poço durante a perfuração, além de manter em suspensão, graças a tixotropia, os resíduos da perfuração, quando o funcionamento da broca é interrompido.

F. Tintas

A bentonita é muito utilizada como espessantes de tintas, devido à sua propriedade de tixotropia.

Quando em repouso, a tinta com bentonita tem uma viscosidade maior. Esta alta viscosidade é desejada quando a tinta está no pincel, para que não escorra e pingue no chão, e após ser aplicada na parede, para que não escorra e prejudique o acabamento. Em ambas estas si-

tuções, a tinta está em repouso, submetida apenas a uma pequena tensão devida à força da gravidade.

Quando não está em repouso, sendo agitada, a tinta apresenta uma viscosidade mais baixa. Isto ocorre no momento da aplicação, onde são aplicadas maiores tensões à tinta, fazendo com que ela deixe o pincel sem maiores resistências.

G. Rações de Gado

Da mesma forma como é feita a pelotização de minério de ferro, a bentonita também pode ser usada para a pelotização de ração de gado.

As rações de gado são alimentos farináceos de difícil transporte. A adição de bentonita nas proporções de 1% a 5% faz com que estes alimentos possam ser aglomerados, formando pellets de fácil transporte.

Além disso, embora não possua nenhum valor alimentício, a bentonita, respeitadas as devidas proporções, aumenta a digestibilidade destes alimentos.

H. Fabricação de Cerâmicas

Nas massas cerâmicas, a bentonita funciona como plastificante, conferindo um aumento da resistência mecânica a cru, com a vantagem de apresentar baixa contração.

Em vidrados e tintas serigráficas cerâmicas tem a função de agente suspensor, podendo substituir parcial ou totalmente os caulins coloidais, mantendo uma perfeita suspensão.

I. Clarificação de Vinhos e Águas Turvas

Devido a preocupações com o meio ambiente, a clarificação de águas turvas é uma preocupação cada vez maior. A bentonita é muito utilizada para esta finalidade pois apresenta um baixo custo e uma grande simplicidade tecnológica.

5. DESCRIÇÃO DO PROCESSO INDUSTRIAL

A. Mineração

A bentonita disponível no Brasil é constituída, principalmente, pelo argilomineral montmorilonítico cálcico, e é encontrada na região de Boa Vista, município de Campina Grande, no Estado da Paraíba.

Estas argilas são constituídas por misturas de argilas montmoriloníticas ou argilomineral de camadas mistas de illita e de montmorilonita. O teor de argilomineral montmorilonítico nas argilas varia entre 55 % e 95 %. São argilas policatiônicas tendo o magnésio, o cálcio, o sódio e o hidrogênio como cátions trocáveis, sendo que o magnésio e o cálcio contribuem com 50 % a 85 % da capacidade total de troca catiônica das argilas. Têm origem vulcânica, talvez do vulcanismo de Abrolhos e regiões vizinhas, sendo formada após sedimentação das cinzas vulcânica em lagos ricos em sais de magnésio, cálcio e sódio.

A mineração é feita por extração superficial a céu aberto. É necessário retirar o material não-aproveitável para que se possa extrair o mineral. Enquanto antigamente poucos metros eram suficientes para se atingir os veios, atualmente, estes veios estão a profundidades que variam entre 2 e 15 metros. Financeiramente, é mais viável extrair a argila que se encontra em menores profundidades pois a quantidade de material não-aproveitável que será removida é menor. No entanto, estes veios mais superficiais já se esgotaram, o que obriga a extração em veios mais profundos, o que fez com que o processo tivesse que ser feito de maneira mais sistemática e organizada.

A extração é feita através de tratores que depositam o material em caminhões basculantes, responsáveis pelo transporte dessa argila até os estoques, localizados nas fábricas.

Quando extraída, a argila apresenta teor de umidade de aproximadamente 25% de seu peso, o que acarreta um aumento dos custos de transporte, pois na verdade, estamos transportando 25% de água. Os custos de transporte seriam reduzidos se a empresa se instalasse próxima à mina, pois só passaria a transportar argila seca.

B. Estocagem

A estrada que leva até as minas não é asfaltada. Com isso, na época das chuvas, que ocorre nos meses de fevereiro a julho, fica impraticável o trânsito por esta estrada. Além disso, a mineração também é impossível já que ocorre o alagamento das minas, pois a argila é bastante impermeável.

Os estoques se localizam a 16 quilômetros das minas, logo no início da estrada asfaltada, o que permite que a empresa opere o ano todo, mesmo nas épocas de chuva.

C. Ativação

O processo de ativação consiste na substituição do cátion trocável Ca^{2+} pelo cátion trocável Na^+ , com o objetivo de obter uma argila bentonítica sódica, através da adição de barrilha.

O material é retirado do estoque e é depositado em dois caixões alimentadores. Um sistema com um parafuso sem-fim, colocado embaixo do caixão, leva o material até uma esteira. Esta esteira jogará o material num desintegrador. Esse desintegrador tem como função reduzir os torrões de argila em pedaços menores, de forma a aumentar a superfície de contato e facilitar a reação de troca de cátions pela penetração de barrilha.

A argila estocada tem aproximadamente 25% de umidade, em peso. Para uma boa reação, esta umidade deve estar em torno de 34%. Portanto, após o desintegrador há uma adição de 4% de água. Essa adição é feita em um misturador que irá homogeneizar a mistura argila + água. Essa reação ocorreria mais rapidamente se houvesse uma maior adição de água. No entanto, uma maior adição de água acarretaria maiores custos de secagem, pois a argila deve entrar no moinho com uma porcentagem de água de 11%.

Após a adição de água, a argila passa por um novo desintegrador, antes de chegar num misturador onde ela será misturada com barrilha (Na_2CO_3), numa quantidade de aproximadamente 3% do total de argila. Este número, no entanto, varia bastante, dependendo da qualidade e do tipo de argila extraída.

Em seguida, a argila com barrilha passa por um laminador, para que a reação de troca seja catalizada. Esse processo é denominado de pré-ativação.

Saindo do laminador, a argila é transportada para um pátio, onde permanecerá por, aproximadamente, cinco dias, onde se dará realmente a ativação.

No final do processo de ativação, obtemos uma argila bentonítica sódica, com teor de umidade de 34%.

D. Secagem

No processo de secagem, deve ser retirada água da argila, que entra com uma porcentagem de 34%, até que a porcentagem baixe para 11%.

O secador utilizado é um secador contínuo rotativo tendo como fonte de energia a queima de óleo de baixo ponto de fluidez (BPF-1A).

Na figura 5, temos um esquema de um secador deste tipo

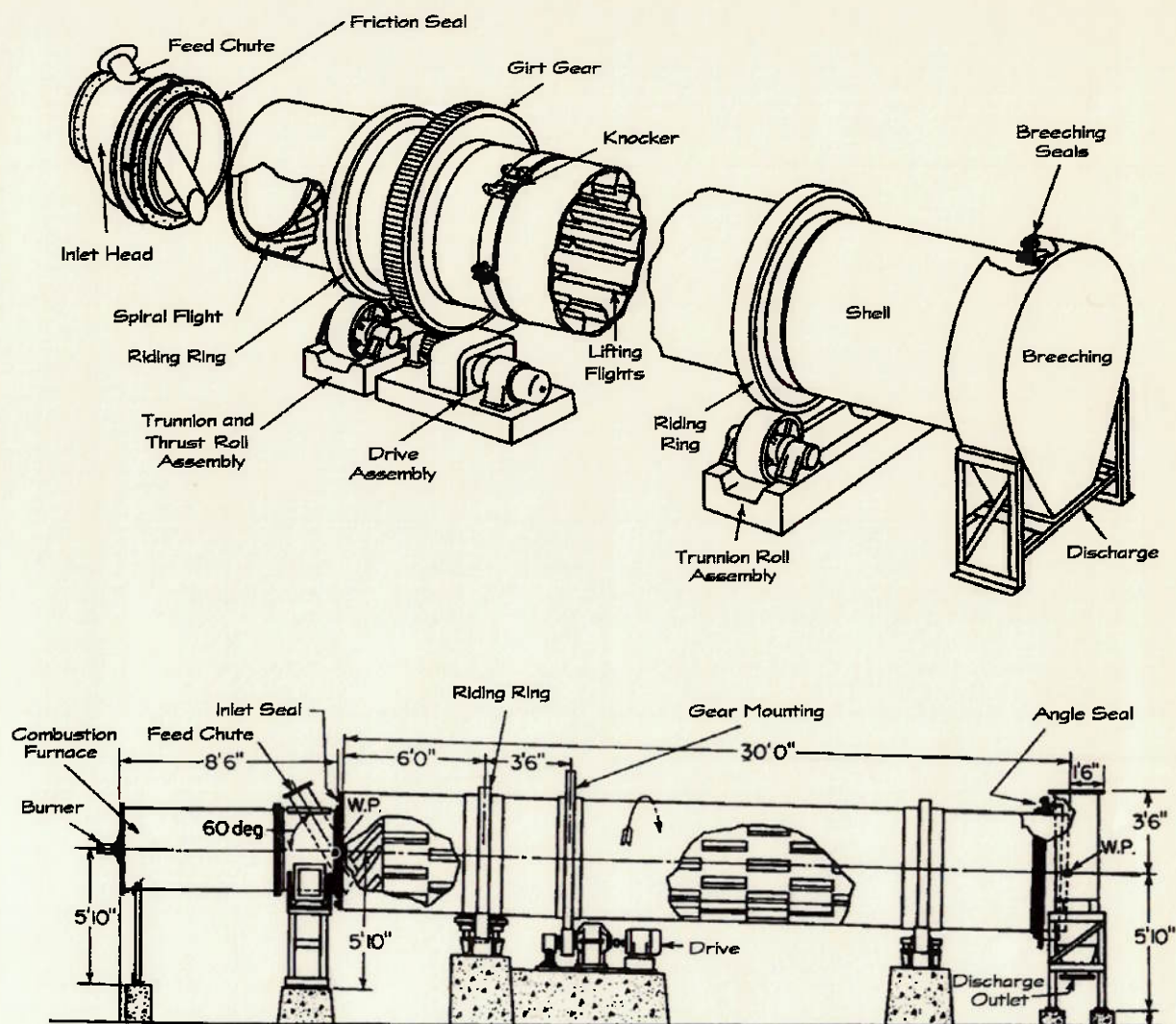


FIGURA 5 - Exemplo de Secador Rotativo de Secagem Contínua.

Ele possui uma fornalha na qual o óleo é queimado. Em seguida, o ar quente, aquecido pela queima do óleo é injetado em uma das extremidades do cilindro de secagem. Pela mesma extremidade que é injetado o ar, também é colocada a argila, através de uma boca de alimentação.

Um motor elétrico faz, por meio de um redutor, com que o cilindro de secagem esteja sempre girando, com um período de 40 segundos, aproximadamente. Nas paredes internas do cilindro, existem palhetas helicoidais que conduzem a argila ao longo de todo o cilindro. No outro extremo do cilindro, existe um exaustor que faz a tiragem do ar, facilitando o escoamento.

O ar seco que escoar ao longo do cilindro, juntamente com a argila, é o responsável pela retirada de umidade da argila.

O teor de umidade na saída pode ser controlado através da variação da intensidade da chama e pela abertura da entrada de ar para a queima do combustível.

As características do secador utilizado pela BUN são as seguintes:

- a. Comprimento do Cilindro: 18 metros;
- b. Diâmetro do Cilindro: 2.5 metros;
- c. Inclinação do Cilindro: 4°;
- d. Redutor: 1:35;
- e. Consumo de BPF: 23 kg/ton bentonita seca;

E. Moagem

Saindo do secador, a argila é transportada para moinhos, nos quais ela é triturada. Os moinhos utilizados são de dois tipos, de martelo e de rolos (tipo Raymond), sendo este último o mais utilizado.

Coletores de pó com ciclone extraem os produtos com granulometria inferior à peneira USS nº200, do moinho Raymond, estocando-os em silos. Um sistema a vácuo para coleta de pó é indispensável em todos os moinhos de bentonita. Coletores de pó são usualmente instalados na forma de tubos rígidos ou de lona em todos os pontos em que pode haver exposição de produto seco no moinho.

F. Ensacamento

O material moído é transportado através de um sistema de parafuso sem-fim até os pontos de ensacamento, onde a argila pode ser ensacada em sacos de 50 quilos ou em big bags de uma tonelada.

G. Transporte

O transporte da bentonita para os centros consumidores pode ser feito de duas maneiras, de caminhão ou através de navios. Devido ao fato da mina se localizar no interior do Estado da Paraíba, longe do Porto de Cabedelo, e do nosso sistema portuário ser muito ineficiente, a maneira atual mais viável de se transportar é através de rodovias.

6. ANÁLISE DOS CUSTOS DO PROCESSO DE SECAGEM

Os custos envolvidos no processo de secagem são os seguintes:

A. Custos de Combustível

O combustível utilizado para a secagem da bentonita é o óleo BPF tipo 1A. Este óleo é injetado no queimador, e a sua queima produz calor. No mês de julho de 1996, a empresa consumiu 160,2 toneladas de óleo e secou 4867 toneladas de bentonita. Como a tonelada de BPF tipo 1A tem um custo, para a empresa de R\$ 146,00, temos:

$$C_1 = \frac{(160,2 \cdot 146)}{4867}$$
$$C_1 = \frac{\text{R\$ } 4,81}{\text{ton}}$$

Utiliza-se, em todas paradas e partidas, óleo diesel, para evitar o endurecimento do óleo BPF no bico injetor do queimador. Isso se deve ao fato de que o óleo BPF apresenta grande viscosidade à temperatura ambiente. Utiliza-se aproximadamente 15 litros de diesel na partida e outros 20 litros na parada do queimador. Estima-se que há duas paradas semanais. O custo do litro de óleo diesel para empresa é de R\$ 0,374. Temos, então:

$$C_2 = \frac{(2 \cdot 4 \cdot 0,374 \cdot 35)}{4867}$$
$$C_2 = \frac{\text{R\$ } 0,02}{\text{ton}}$$

Portanto:

$$C_a = C_1 + C_2$$
$$C_a = \frac{\text{R\$ } 4,83}{\text{ton}}$$

B. Custo de Mão de Obra

Existem três pessoas envolvidas diretamente no processo de secagem. Um deles opera a linha, controlando a chama do queimador e a alimentação de bentonita no secador. O segundo permanece na saída do secador, controlando as características do produto seco. E o terceiro é o tratorista que dirige uma pá carregadeira, cuja função é de alimentar o secador.

Um funcionário destes ganha de salário aproximadamente R\$ 300.00 ao mês. Contudo o custo por funcionário é superior, pois deve-se computar as férias (1/12), o 13º salário (1/12), FGTS (8%), assistência médica, refeição e roupa, atingindo um custo de aproximadamente R\$ 700.00.

É muito comum a empresa trabalhar ininterruptamente, necessitando então de quatro turnos. Temos então o seguinte custo de mão de obra:

$$C_b = \frac{(700 \cdot 3 \cdot 4)}{4867}$$
$$C_b = \frac{\text{R\$1.73}}{\text{ton}}$$

C. Custo de Manutenção

Existem algumas manutenções frequentes, como a lubrificação da corrente responsável pela rotação do cilindro, a limpeza do bico injetor, entre outras. Há, também, a necessidade de se fazer, no mínimo uma vez ao ano, uma reforma no secador, na qual o material refratário danificado do queimador é substituído, rolamentos são trocados, materiais de isolamento checados. Os custos atingem, por tonelada, R\$ 0.42, segundo dados fornecidos pela empresa.

$$C_c = \frac{\text{R\$ 0.42}}{\text{ton}}$$

D. Custo da Pá Carregadeira

Um trator permanece o dia inteiro transportando bentonita úmida do estoque ao secador e retirando-a seca logo após o secador, consumindo óleo diesel. O consumo de diesel é de 18 litros por hora de trabalho. Como o trator trabalha aproximadamente 20 horas diárias, temos:

$$C_d = \frac{(18 \cdot 20 \cdot 30 \cdot 0.374)}{4867}$$

$$C_d = \frac{R\$0.83}{\text{ton}}$$

E. Custo de Energia Elétrica

Os seguintes equipamentos consomem energia elétrica:

motor elétrico para rotação do cilindro:	30	kW
motor elétrico para a estelra de alimentação	3	kW
motor elétrico da aliment. de ar do queimador	12.5	kW
pré-aquecedor de óleo BPF	8	kW
aquecedor de óleo BPF	14	kW
motor elétrico do exaustor do secador	45	kW
TOTAL	112.5	kW

Esses motores funcionam por aproximadamente vinte horas diárias e por aproximadamente 25 dias ao mês. Considerando que o MWh custa aproximadamente R\$ 65.00, temos que o custo da energia elétrica no processo vale:

$$C_e = \frac{112.5 \cdot 20 \cdot 25 \cdot 65}{1000 \cdot 6000} = 0.61 \frac{\text{R\$}}{\text{ton}}$$

F. Amortização do Equipamento

F1. Custo de Aquisição

Segue abaixo o custo estimado de equipamentos novos, com preços fornecidos pela empresa:

Cilindro:	R\$ 170.000,00
Base de Concreto:	R\$ 15.000,00
Câmara de Combustão:	R\$ 90.000,00
Maçarico:	R\$ 25.000,00
Instalação de Óleo:	R\$ 15.000,00
Exaustor:	R\$ 13.000,00
Biciclone:	R\$ 25.000,00
Cobertura contra Chuva:	R\$ 15.000,00
Caixão Alimentador:	R\$ 17.000,00
Esteiras Alimentadores:	R\$ 12.000,00
Equipamentos Elétricos:	R\$ 30.000,00
 Custo Total de Aquisição	 R\$ 427.000,00

F2. Vida Útil do Equipamento

Estima-se que, para este tipo de aplicação, o equipamento tem uma vida útil aproximada de vinte anos.

F3. Cálculo do Custo de Amortização

Por mês, são secados 6.000 toneladas de argila. Em um ano, são secadas 72.000 toneladas. Portanto, em vinte anos, serão secadas 1.440.000 toneladas.

O custo de amortização é igual ao custo de aquisição dividido pela quantidade de material secado.

$$C_f = \frac{\text{R\$0.30}}{\text{ton}}$$

G. Custo Total do Processo de Secagem

Portanto o custo total de secagem, que é a soma de todos os custos, é:

$$C_T = \frac{R\$8.72}{\text{ton}}$$

A empresa não forneceu os custos das outras partes do processo, apenas relatou que os custos de secagem representam aproximadamente de 10 a 15 % dos custos totais da empresa.

7. PROCESSO DE SECAGEM

A. Introdução

Os processos de secagem consistem na remoção de uma certa quantidade de água de um sólido, líquido ou gás.

Dependendo do estado da substância que desejamos secar, podemos utilizar processos diferentes. A umidade pode ser removida de líquidos ou gases pela adsorção por um sólido, por exemplo sílica, por absorção em um líquido como por exemplo ácido sulfúrico, por refrigeração ou por destilação. No caso de sólidos, podemos remover a umidade através de prensas, centrífugas ou termicamente, por vaporização.

No caso específico deste trabalho, secagem de argilas bentoníticas, estaremos interessados apenas nos métodos relacionados com a vaporização.

B. Equipamentos de Secagem

Para a secagem de sólidos por vaporização existem diversos equipamentos que estão listados na tabela 2 de acordo com o grau de umidade do material a ser secado e o tipo de operação.

Além disso, os secadores podem ser classificados em secadores de contato diretos, nos quais os gases provenientes da queima entram em contato com o material a ser secado, e secadores indiretos, nos quais este contato não existe.

Tipo de Material	Secagem por Lotes	Secagem Contínua
Rígido	Tray dryer	Tunnel dryer
Granular ou Pasta:		
Material não-agitado	Tray dryer	Screen-conveyor dryer
Material agitado	Pan dryer	Rotary dryer
		Screw-conveyor dryer
		Flash dryer
		Tower dryer
Lâminas Flexíveis	-----	Cylinder dryer
	-----	Festoon dryer
Soluções ou Pastas	-----	Spray dryer
	-----	Drum dryer

TABELA 2 - Tipos de Secadores

C. Secadores Rotativos

No caso que estamos estudando, temos um secador rotativo de contato direto.

Estes secadores consistem em um cilindro rotativo, levemente inclinado em direção à saída. A material úmido entra em uma das extremidades do cilindro e sai pela outra. O movimento do material dentro do cilindro é devido a palhetas internas que, quando o cilindro está girando, levantam o material, fazendo com que, a partir de uma certa altura, ele caia, passando pelo centro do cilindro, onde ele entrará em contato com os gases de combustão. Os gases de combustão estão escoando a uma certa velocidade e, além de retirarem a umidade da argila, fazem com que a argila seja transportada e caia um pouco mais à frente, acelerando o processo. Caso o secador seja de contra corrente, o processo será retardado. O processo se repete até que o material deixe o cilindro com o seu teor de umidade reduzido.

8. PRINCÍPIOS DE SECAGEM

A. Umidade de Equilíbrio e Umidade Livre

A secagem está relacionada com dois fenômenos físicos: a transferência de calor e a transferência de massa.

A transferência de massa ocorre por difusão, graças à diferença entre a umidade do ar e a umidade da argila.

O ar, ao entrar no secador, apresenta um dado teor de umidade relativa, sendo que o ar seco apresenta umidade relativa de 0% e o ar saturado apresenta umidade relativa de 100%. Da mesma forma, a argila também apresenta um teor de umidade expresso pela relação entre a massa de água e a massa de argila.

Caso o ar esteja mais úmido, ele irá ceder umidade para o sólido. Caso o sólido esteja mais úmido acontecerá o contrário. Este processo irá se manter, a taxas decrescentes, até que ambos entrem em equilíbrio. A parcela de água que não pode ser removida pelo ar, por causa do teor de umidade deste último, é chamada umidade de equilíbrio.

Existem curvas de equilíbrio para cada temperatura, que nos informam, para uma determinada porcentagem relativa de umidade no ar, qual será a umidade de equilíbrio para o sólido. Exemplos destas curvas podem ser vistos na figura 6.

Podemos ver, por exemplo, que na secagem de cola utilizando ar a 25°C. com teor de umidade de 30%, a umidade de equilíbrio é de aproximadamente 6%, ou seja, não é possível secar a cola com um teor de umidade menor do que 6% em massa, com essas condições do ar.

Podemos definir a umidade livre de um sólido, que é a diferença entre a umidade total do sólido e a umidade de equilíbrio. A umidade livre varia, portanto, com a temperatura e com as condições do ar de entrada. É esta umidade relativa que é importante do ponto de vista da secagem.

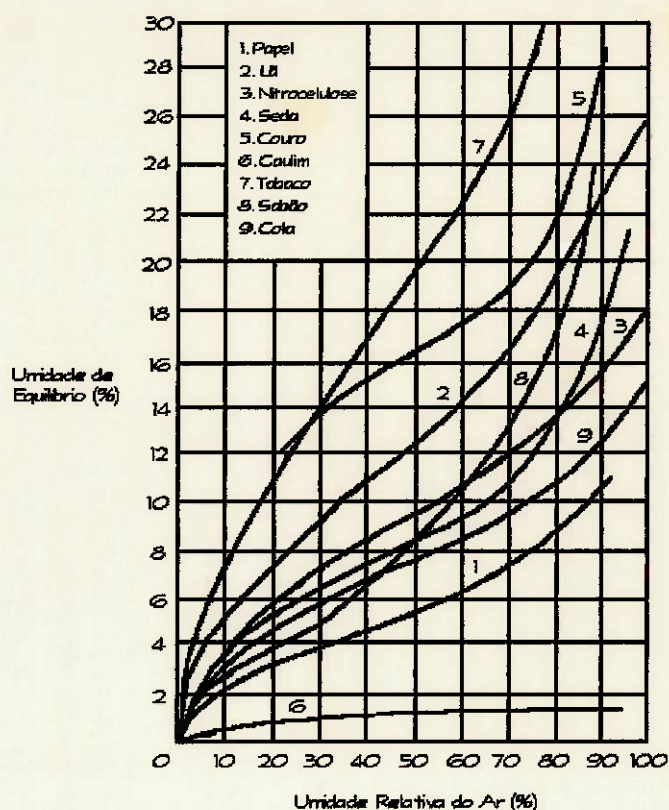


FIGURA 6 - Curvas de Equilíbrio de Umidade

B. Água Ligada e Água Livre

Se nós prolongarmos a curva de equilíbrio até que intercepte o eixo de 100% de umidade relativa, teremos o teor de umidade mínimo, abaixo do qual a pressão de vapor do material é menor do que a pressão de vapor da água na mesma temperatura.

Assim sendo, podemos definir dois tipos de "águas". A água ligada exerce uma pressão de vapor menor do que a exercida pela água na mesma temperatura. A água livre exerce a sua pressão total de vapor.

Para o mesmo exemplo anterior, veremos que a cola apresenta uma umidade de equilíbrio de 15%, com relação ao ar saturado. Se tivermos uma amostra de cola com 25% de umidade, saberemos que 10% dessa umidade se deve à água livre e os outros 15% se deve à água ligada. Se quisermos secar esta cola com ar com 50% de umidade, a 25°C, poderemos

chegar a uma umidade mínima de 7.5%, aproximadamente. Precisariamos, portanto, evaporar 10% de água livre e 7.5% de água ligada.

A definição de água ligada e água livre depende do material, ao passo que a definição de umidade de equilíbrio e umidade livre depende das condições em que será efetuada a secagem.

C. Taxa de Secagem

Para que a água presente no material seja evaporada é necessário que ela receba calor. Dependendo das condições do material e do processo, esta água estará próxima à superfície do sólido ou no interior do sólido. Esta água irá fluir até a superfície do sólido como água ou como vapor e da superfície do sólido para o ar ou para a corrente de gases de combustão na forma de vapor.

Portanto, a capacidade de secagem de um secador rotativo depende tanto da taxa de transferência de massa quanto da taxa de transferência de calor.

C1. Transferência de Calor nos Secadores

Quando todo o calor fornecido para evaporar a água é fornecido pelo contato direto com os gases quentes, e os fornecimentos de calor através da condução a partir do contato com superfícies quentes e através da radiação são desprezíveis, dizemos que temos uma secagem adiabática. É precisamente este o caso que nós temos no estudo da secagem das argilas bentoníticas.

Enquanto estivermos removendo apenas água livre, a temperatura na região de vaporização será a mesma do equilíbrio entre o ar e a água líquida. Conforme começarmos a evaporar a água ligada, a temperatura da região de vaporização será a do vapor superaquecido já que a pressão de vapor da água ligada é menor do que a da água na mesma temperatura. Quando estivermos removendo os últimos resquícios de umidade, a temperatura do sólido se aproximará da temperatura dos gases de combustão.

C2. Mecanismo de Secagem dos Sólidos

Existem dois tipos diferentes de sólidos que podem ser considerados para efeito de secagem. Muito embora os sólidos ocupem uma posição intermediária, podemos admitir que os sólidos são porosos ou não-porosos, sendo, portanto, higroscópicos ou não-higroscópicos.

Os detalhes da secagem de um dado sólido devem ser examinados do ponto de vista de como a taxa de secagem varia em função das condições do ar e o que ocorre dentro do sólido durante o processo de secagem.

C3. Curva de Taxa de Secagem

A curva de taxa de secagem relaciona a taxa de secagem com uma relação entre a umidade livre presente no sólido a ser secado e a quantidade de sólido seco.

Um exemplo de uma curva de taxa de secagem pode ser visto na figura 7.

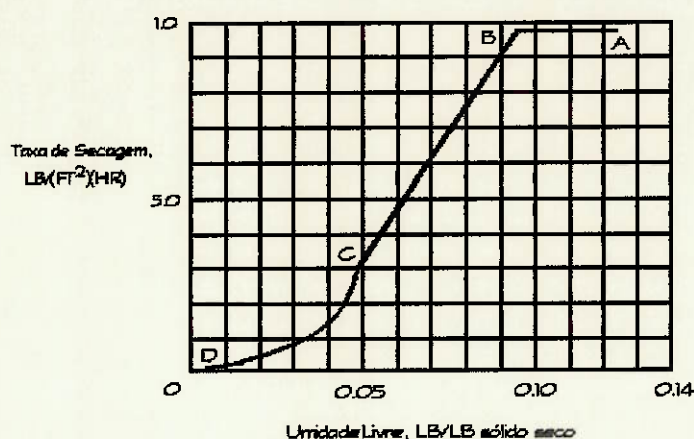


FIGURA 7 - Curva de Taxa de Secagem para argilas porosas

As curvas de secagem apresentam dois segmentos distintos.

Um dos segmentos, onde a secagem ocorre de maneira constante, no qual a taxa de secagem independe da umidade do sólido que está sendo secado. Durante esta etapa, o sólido está tão úmido que apresenta um filme de água cobrindo toda a superfície de secagem. Do ponto de vista de secagem, é como se o sólido não estivesse presente.

Para um sólido poroso, esta água está sendo suprida constantemente pela água presente no interior do sólido, que chega à superfície por difusão. É o mesmo processo que ocorre com um termômetro de bulbo úmido. Portanto, na ausência de transferência de calor por radiação ou por condução através do contato com superfícies secas, a temperatura do sólido é temperatura de bulbo úmido do ar.

Conforme a taxa de umidade vai decrescendo, a taxa de secagem começa a decrescer. O ponto a partir do qual isto começa a ocorrer é chamado de ponto crítico e está associado a uma umidade crítica que é determinada experimentalmente para diversos materiais. A partir deste ponto, a água líquida na superfície não é suficiente para manter uma película contínua cobrindo toda a superfície de secagem. Em sólidos não-porosos, isto ocorre quando o fluxo de umidade para a superfície do sólido é menor do que a taxa de evaporação.

Partes do sólido ficam expostas, sem umidade, o que faz com que a superfície disponível para troca seja reduzida e com que a taxa de secagem diminua.

D. Secagem de Sólidos Porosos e Fluxo de Água por Capilaridade

A umidade escoar através de um sólido por capilaridade. Um material poroso possui uma complexa rede de poros e canais interconectados. As saídas destes canais estão na superfície do material que está sendo secado e é nestas saídas que se formam os meniscos, conforme a água evapora, responsáveis pelo surgimento das forças capilares que garantem o fluxo de água para a superfície do sólido. A intensidade destas forças capilares dependem da curvatura do menisco que, por sua vez, depende da seção do poro. Poros menores terão maiores forças capilares.

Podemos acompanhar o fenômeno de secagem de uma argila porosa pela figura 7.

Enquanto temos um fluxo de água que compense a taxa de evaporação, temos uma secagem a taxas constantes. Esta etapa é representada na figura pelo trecho AB.

Porém, quando passarmos do ponto crítico, a superfície do sólido irá começar a secar e os poros maiores ficarão sem água antes dos menores. Embora a taxa de secagem nos poros menores continue constante, nas regiões dos poros maiores a superfície do material começa a ficar exposta e as taxas de secagem são reduzidas. Portanto, globalmente, a taxa de secagem é reduzida graças à redução da evaporação nos poros maiores. Este fenômeno engloba, progressivamente, todos os poros do material a ser secado, sendo que os menores poros serão os últimos. O trecho BC corresponde a esta etapa.

Continuando a secagem, os poros vão sendo progressivamente ocupados com ar, até que, a partir de um certo ponto, ocorre uma quebra das condições necessárias para que ocorra o fenômeno da capilaridade.

A partir deste momento, a zona de vaporização se reduz a pequenas áreas dispersas pelo sólido, e a taxa de vaporização se torna independente da velocidade de escoamento do ar.

O calor fornecido chega à água por condução através dos sólidos e transforma a água em vapor d'água. O vapor, por sua vez, precisa se difundir através do sólido para ser removido na superfície.

E. Cálculo do Tempo de Secagem

No projeto de um secador rotativo, um parâmetro muito importante é o tempo de secagem. Determina o tempo que o material necessita permanecer dentro do secador para que ele atinja o grau de umidade desejado.

Para secagem em condições constantes, o tempo de secagem pode ser obtido a partir da curva de taxa de secagem, se ela puder ser obtida.

F. Secagem de Materiais Higroscópicos

Quando o material é poroso e higroscópico ao mesmo tempo, a análise desenvolvida com relação aos efeitos da capilaridade se aplica somente à água livre. A água ligada se comporta como a água restante quando processo de capilaridade é interrompido, ou seja, por vaporização progressiva e difusão do vapor através do sólido.

9. TEMPO DE RETENÇÃO

A. Introdução

Secadores rotativos podem processar uma grande variedade de materiais, incluindo partículas de madeira, carvão, fertilizante, areia, argila e outros agregados. Para esta grande variedade de aplicações, uma vasta gama de configurações de secadores foram desenvolvidas. O cilindro pode consistir de um arranjo com uma ou múltiplas passagens, operar com o escoamento de contra-corrente ou co-corrente, ter a chama com contato direto ou indireto e ter diversas configurações internas de suas paletas.

Em qualquer caso, o princípio de funcionamento é o mesmo. O material úmido entra no cilindro rotativo e é continuamente cascadeado através da corrente de gás em movimento. As partículas retidas nas paletas se rotacionam com o cilindro e as partículas em queda são arrastadas no sentido do comprimento do cilindro, devido à força de arrasto imposta pelo escoamento do gás. A secagem ocorre essencialmente devido ao calor convectivo e à transferência de massa entre os gases de combustão e a argila.

A performance de secadores rotativos é fortemente influenciado pela taxa de transferência de calor do gás para a partícula e pelo tempo de retenção do material no secador. As características de secagem do material normalmente determinam qual o tempo de retenção no cilindro; portanto uma análise na transferência de calor e nos parâmetros que influenciam o tempo de retenção é de grande importância para o projeto de secadores rotativos.

B. Tempo de Retenção - Determinação da Equação

A seguir mostraremos um método desenvolvido para o cálculo da distribuição da velocidade das partículas em movimento no cilindro, definindo a velocidade da partícula, cujo movimento se dá por cascadeamento, como sendo L_e/t , onde L_e é o comprimento efetivo do cilindro, e t o tempo necessário para se percorrer a distância L_e . Esta análise permite que se calcule um tempo médio de residência baseado nas propriedades das partículas e nas variáveis operacionais do cilindro (comprimento, diâmetro, inclinação, velocidade de rotação do cilindro e velocidade do escoamento dos gases). Portanto os parâmetros de projeto podem ser determinado de tal forma que o tempo de residência calculado se iguale a um determinado tempo, necessário para evaporar a massa de água desejada.

B.1 Equação de Transporte de uma Única Partícula

Uma partícula caindo da posição A, na circunferência do cilindro progride através do cilindro numa série de cascadeamento, por exemplo o trecho ABA demonstrado na figura 8.

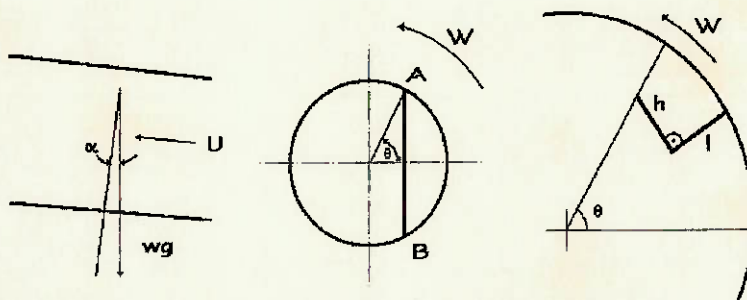


FIGURA 8 - Esquema de Cascadeamento no Secador Rotativo

O tempo de permanência da partícula no cilindro é igual ao produto entre o número de cascadeamentos C e o tempo de um cascadeamento.

$$T = C(t_q + t_s) \quad (1)$$

onde: C = número de cascadeamento;

t_q = tempo de queda;

t_s = tempo de subida

$$C = \frac{L_e}{x} \quad (2)$$

onde: L_e = comprimento efetivo do cilindro;

x = distância percorrida pela partícula/cascadeamento

Para determinar x , a distância percorrida pela partícula por cascadeamento, deve-se analisar as forças atuantes na partícula na direção paralela ao comprimento do cilindro durante a queda. Após deixar a paleta, a partícula, em contato com o escoamento dos gases, sofre a ação do arrasto. Esta força atuará tanto na direção paralela ao eixo do cilindro, quanto na direção contrária à queda da partícula. O efeito deste último pode ser desprezado se comparado ao efeito da força de aceleração devido à gravidade e portanto as equações de movimento para corpos em queda pode ser aplicado.

A resistência ao arrasto em partículas esféricas pode ser expressa em função do número de Reynolds, baseado na velocidade relativa entre fluido e partícula.

$$\text{para } Re \leq 0.2 \quad f = \frac{12}{Re}$$

$$\text{para } 0.2 \leq Re \leq 2000 \quad f = \frac{12 (1 + 0.15 Re^{0.687})}{Re}$$

$$\frac{C_D}{2} = \frac{F_D}{\rho V^2 A} = f$$

A análise das forças na direção paralela ao comprimento do cilindro para uma única partícula esférica nos leva às seguintes equações:

$$\frac{dv_x}{dt} = g \operatorname{sen} \alpha - K(V + v_x)^2 \quad (3)$$

onde: v_x = velocidade na direção x;

g = aceleração da gravidade;

α = ângulo de inclinação do cilindro;

V = velocidade do escoamento dos gases

$$K = 1,5 \frac{f \rho_a}{d \rho_s}$$

onde: f = força de arrasto;

ρ_a = densidade do ar;

ρ_s = densidade do sólido;

d = diâmetro da partícula

A expressão $(V+v_x)$ pode ser substituída por uma velocidade relativa V_r . Integrando a equação (3) duas vezes, obtemos:

$$x = \frac{1}{2}(g \operatorname{sen} \alpha)t^2 - \frac{1}{2}(KV_r^2)t^2 \quad (4)$$

Onde: x = distância percorrida pela partícula na direção paralela ao eixo do cilindro até o instante t . No final da queda $t = t_q$ e a distância percorrida pela partícula vale:

$$Y = D_e \frac{\operatorname{sen} \theta}{\cos \alpha} \quad (5)$$

onde: Y = altura de queda;

D_e = diâmetro do cilindro (entre paletas);

θ = ângulo de queda da partícula;

α = ângulo de inclinação do cilindro

ou substituindo $Y = \frac{1}{2}gt^2$ na equação (4) temos:

$$x = Y \operatorname{sen} \alpha - \frac{Y(KV^2)}{g} \quad (6)$$

Substituindo a equação (5) na (6), temos :

$$x = \frac{D_e \operatorname{sen} \theta}{\cos \alpha} \left(\operatorname{sen} \alpha - \frac{KV^2}{g} \right) \quad (7)$$

O tempo de subida t_s da partícula na periferia do cilindro pode ser calculado da seguinte forma:

$$t_s = \frac{\theta}{\pi N} \quad (8)$$

onde: N = velocidade de rotação do cilindro;

O tempo de queda da partícula vale:

$$t_q = \sqrt{\frac{2Y}{g}} \quad (9)$$

Substituindo as equações (2), (7), (8) e (9) na equação (1), obtemos a expressão final do tempo de retenção de uma partícula no cilindro rotativo.

$$T = \frac{L_e \cos \alpha g}{D_e \sin \theta (g \sin \alpha - K V_r^2)} \left(\sqrt{\frac{2Y}{g}} + \frac{\theta}{\pi N} \right) \quad (10)$$

Um problema que surge é na determinação da posição de cascadeamento da partícula. Isto porque a partícula pode estar na superfície da paleta, conseqüentemente deixando a paleta cedo (θ pequeno) ou se encontrando no fundo da paleta, precisando aguardar uma angulação maior para cascadear. Como θ varia, a distância de queda Y também varia. Para podermos calcular o tempo de retenção do material no cilindro, é necessário determinar uma distribuição média de queda da partícula e eventualmente efetuar algumas simplificações, tornando a análise viável.

B.2. Distribuição de velocidades através do cilindro

Se o tempo de queda é muito menor que o tempo de subida, a equação (10) pode ser simplificada para:

$$\frac{L_e}{T} = Z \frac{\sin \theta}{\theta} \quad (11)$$

e

$$Z = \frac{\pi N D_e}{g \cos \alpha} (g \sin \alpha - K V_r^2)$$

onde: L_e/T é a velocidade da partícula movendo através do cilindro

$$t_q \ll t_s$$

Para as partículas distribuídas por todas as paletas do cilindro, a taxa de material transportado é dada pela equação (11) que corresponde ao volume de sólido ($V(\theta) - V(\theta + \theta_i)$) que deixa a paleta quando sua posição varia de θ para $\theta + \theta_i$.

$$\left(\frac{L_e}{T} \right)_{\text{medio}} = \frac{1}{V(0)} Z \int_0^{V(0)} \frac{\sin \theta}{\theta} dV \quad (12)$$

Supõe-se que a paleta está completamente cheia quando $\theta=0$. A partir deste instante considera-se o início do processo de cascadeamento. Neste modelo, parte-se do princípio que não há rolamento de material na parte inferior do cilindro causado pelo excesso de material ou por paletas muito distanciadas umas das outras. A velocidade máxima da partícula ocorre quando θ tende a 0, pois:

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} \left(\frac{L_e}{T} \right) = \lim_{\theta \rightarrow 0} Z \frac{\sin \theta}{\theta} = Z \quad (13)$$

B.3. Distribuição Uniforme

Suporemos que a distribuição da velocidade é uniforme. Isto significa que as partículas vão cascadeando igualmente em cada um dos lados do cume do cilindro, iniciando quando $\theta = 0^\circ$ e finalizando quando $\theta = 180^\circ$, conforme a expressão abaixo:

$$\theta = \pi \left(1 - \frac{V}{V(0)} \right) \quad (14)$$

$$d\theta = -\pi \frac{dV}{V(0)} \quad (15)$$

Substituindo a equação (15) na equação (12), temos:

$$\left(\frac{L_e}{T} \right)_{\text{medio}} = -\frac{1}{\theta} Z \int_0^0 \frac{\sin \theta}{\theta} d\theta = 0,59 Z$$

Como a distribuição é uniforme o ângulo médio vale $\theta = \frac{\pi}{2}$

C. Equação Empírica para Determinação do Tempo de Retenção

Friedman e Marshall desenvolveram uma relação empírica para secadores rotativos cilíndricos com uma simples passagem, paletas retangulares e escoamento co-corrente. Esta relação pode ser aplicada a diversos tipos de materiais, inclusive argilas.

$$T = 0.23 \frac{L}{(\tan \alpha) N^{0.9} D} + 0.59 \frac{BLU}{F}$$

e

$$B = 5D_p^{-0.5}$$

onde: B = constante que depende do material;

D_p = média ponderada das partículas do material manipulado (μ);

L = comprimento do cilindro (ft);

U = velocidade mássica do ar (lb/h ft^2);

F = velocidade de alimentação do secador ($\text{lb de material seco/h ft}^2$);

N = velocidade de rotação do cilindro (rpm);

D = diâmetro do secador (ft);

α = inclinação do cilindro ($^\circ$);

D. Conclusão - críticas aos modelos utilizados

1. Kamke e Wilson efetuaram testes mostrando que as partículas não se comportam independentemente, como foi anteriormente assumido no modelo. Ao injetarem no secador uma quantidade de material radioativo, com determinado diâmetro médio, junto ao escoamento, observou-se que durante o cascadeamento as partículas caíam em cortinas, separadas por pequenas áreas livres entre as partículas. Dentro da cortina, algumas partículas podiam servir de escudo para outras, afetando o escoamento. Quanto mais densa a cortina, maior a interação entre as partículas. Como resultado, Kamke e Wilson observaram que o escoamento de uma partícula unitária é influenciado pelo escoamento da massa de partículas como um todo.

2. Para a determinação do diâmetro da partícula, utilizou-se, no modelo, o diâmetro médio. Isto foi feito estatisticamente retirando n amostras de pedaços de argila, fazendo-se uma

média aritmética. Kamke e Wilson observaram que como as partículas se comportam como um grupo em constante interação gás-partícula e partícula-partícula, um método mais eficaz de estimar o diâmetro médio seria: analisar uma porção completa de amostra. Através da utilização de uma sequência de peneiras poderia se determinar um histograma da frequência pelo diâmetro da partícula, calculando assim o diâmetro médio. Kamke e Wilson conseguiram reduzir em 80% o erro entre o tempo de retenção medido e calculado.

3. Neste modelo, parte-se do pressuposto de que não há nem excesso de material na parte inferior do cilindro, onde o tempo de retenção é muito maior, e nem escassez de material na parte superior, que afetaria a distribuição das partículas durante as sucessivas quedas. Para $m=1$, sendo m a porcentagem em relação à quantidade ideal de material, temos a quantidade exata. Na figura 9, temos demonstrado como o tempo de retenção é sensível à variação da quantidade de material no cilindro, em função de três parâmetros.

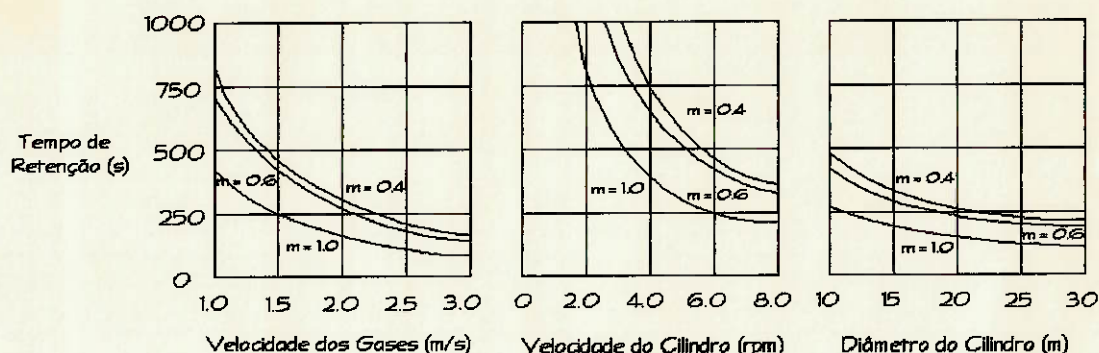


FIGURA 9 - Sensibilidade do Tempo de Retenção

Este diagramas são apenas um exemplo elaborado por Kamke e Wilson, não correspondendo ao caso que estamos analisando.

4. Embora o tempo de retenção calculado pela equação empírica, para as condições de operação que encontramos na empresa, tenha sido muito próximo ao calculado pelo nosso modelo de determinação do tempo de retenção, acreditamos que isto se deveu ao mero acaso, já que desconhecemos a procedência da fórmula empírica e desconhecemos, portanto, as condições nas quais ela pode ser utilizada.

10. CÁLCULO DA UMIDADE RELATIVA DO MATERIAL ATRAVÉS DO CILINDRO

Para o cálculo da umidade na saída do cilindro, as seguintes hipóteses foram feitas:

- a. O formato da argila é esférico;
- b. Só existe água livre na argila;
- c. Como o tempo de subida da argila é aproximadamente 35 vezes o tempo de queda, considera-se que durante a subida há a uniformização da temperatura e da umidade na própria partícula e entre as partículas vizinhas;
- d. Só há perda de umidade pelo material durante a queda das partículas.

No nosso modelo, dividimos o cilindro em vários segmentos, correspondentes uma cascata, e em cada um destes segmentos, ocorrem duas etapas: a primeira é o transporte da partícula do ponto inferior do cilindro até o ponto superior, posição esta a partir da qual teremos o início da segunda etapa, a de queda. Portanto a partícula percorrerá uma sequência de segmentos até alcançar a saída do cilindro.

Analisando o primeiro segmento, temos a seguinte equação da continuidade:

$$m_{\text{agua part}}^e = m_{\text{agua part}}^s + m_{\text{evaporada}}^s$$

A massa da argila na entrada pode ser determinado, conhecendo a densidade e o volume da partícula e a sua umidade relativa.

$$m_{\text{part}}^e = \rho \times V$$

onde: ρ = densidade da partícula;

V = volume da partícula;

$$m_{\text{agua part}}^e = \Phi \times m_{\text{part}}$$

onde: Φ = umidade relativa da partícula;

Para se determinar a umidade relativa da partícula na saída do segmento é necessário determinar a massa de água evaporada. Temos portanto:

$$m_{\text{evaporada}}^s = W_A \times t_q$$

onde: W_A = taxa de evaporação;

t_q = tempo de queda da partícula;

A taxa de evaporação da partícula pode ser calculada da seguinte forma:

$$W_A = K_R \cdot A \cdot K_C \cdot (c_{AS} - c_{A\infty})$$

onde: K_R = coeficiente de resistência à evaporação;

A = superfície da partícula;

K_C = coeficiente de transferência de massa;

c_{AS} = concentração de água na superfície;

$c_{A\infty}$ = concentração de água nos gases;

O tempo de queda é calculado da seguinte forma:

$$t_q = \sqrt{\frac{2Y}{g}}$$
$$Y = \frac{2D_e}{\pi \cos \alpha}$$

onde: D_e = diâmetro do cilindro;

α = ângulo de inclinação;

Y = altura de queda;

O coeficiente de resistência depende do material que está sendo secado e deve ser determinado experimentalmente. Este coeficiente tem comportamento exponencial e é função da umidade relativa da partícula:

$$y = a \cdot e^{b \cdot \Phi}$$

onde: a e b são determinados experimentalmente;

Para se determinar o coeficiente de transferência de massa foi utilizado a equação de Froëssling, considerando tanto o efeito de convecção natural quanto forçada.

$$Nu = 2,0 + 0,552 \cdot Re^{1/2} \cdot Sc^{1/3} + 0,4 \cdot Gr^{1/2} \cdot Sc^{-1/6}$$

$$Nu = \frac{K_C \cdot d_p}{D_{AB}}$$

onde: Re = número de Reynolds;

Gr = número de Grashof;

Sc = número de Schmidt;

d_p = diâmetro da partícula;

D_{AB} = difusibilidade da água;

Os números adimensionais de Grashof, Reynolds e Schmidt são calculados da seguinte maneira:

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}}$$

onde: ν = viscosidade cinemática dos gases;

$$Gr = \frac{d_p^3 \cdot \rho \cdot g \cdot \Delta \rho_A}{\mu^2}$$

onde: ρ = densidade dos gases;

$\Delta\rho_A$ = Diferença de densidade do gás saturado à temperatura do material e da densidade do gás a sua temperatura;

μ = viscosidade dinâmica;

$$Re = \frac{U \cdot d_p}{\nu}$$

onde: U = velocidade dos gases;

A sequência de cálculos nos diversos segmentos foi feita utilizando métodos computacionais. Para este modelo foi feita a hipótese que a temperatura varia exponencialmente ao longo do cilindro. Possuindo as condições de contorno é possível determinar esta função que é do tipo:

$$T(x) = T_0 \cdot e^{-m \cdot x}$$

onde T_0 = Temperatura de entrada;

m = coeficiente que depende da temperatura de saída;

x = posição do cilindro

Para se determinar a temperatura de entrada, foi necessário efetuar um balanço de massa e de energia no secador rotativo, de tal forma que pudéssemos ter a composição dos gases de combustão. Os cálculos e os comentários sobre estes balanços estão no Anexo I.

As propriedades dos gases, tais como densidade, viscosidade e o calor específico variam consideravelmente com a temperatura. Foi então desenvolvido equações do segundo grau que simulam o comportamento das propriedades dos gases em função da temperatura. Elas são do tipo:

$$\nu = a + b \cdot T(x) + c \cdot T^2(x)$$

onde a , b e c = coeficientes;

$T(x)$ = temperatura na posição x ;

Com relação às hipóteses e à adoção deste modelo para descrever a secagem ao longo do secador rotativo, existem algumas críticas que podem ser feitas.

A primeira delas a falta de dados experimentais que comprovem a validade do modelo utilizado. O coeficiente de resistência à retirada de água depende do material e, na faixa considerada, pode não variar exponencialmente, conforme foi suposto. Para confirmar a variação deste coeficiente, necessitaríamos de mais dados experimentais.

Também a hipótese de que as partículas são esféricas não se encaixa bem às argilas com as quais estamos lidando, pois elas são formadas por camadas (folhas) e estão desagregadas de maneira irregular. Portanto este é um bom modelo para pequenas variações do diâmetro da partícula em torno do valor tomado como base.

11. SECAGEM ATRAVÉS DE MICROONDAS

A. Introdução

Uma das aplicações industriais de microondas é o processamento eletrotérmico de materiais.

Nos processos de aquecimento comuns, utilizamos a transferência de calor para fornecer energia de um corpo "quente" para um corpo "frio". Nos processos ligados ao aquecimento dielétrico, o material recebe energia transportada através de ondas eletromagnéticas de alta frequência, de 2.5 a 1000 MHz, que só será transformada em calor no interior do próprio material. Não ocorre, portanto, transmissão de calor do meio externo para o meio interno.

No aquecimento dielétrico, existe um dispositivo que substitui o trocador de calor convencional, que se chama aplicador. O aplicador, ao invés de transferir calor ao material, aplica neste as ondas de alta frequência produzidas no gerador. São estas ondas de alta frequência que penetram no material, ocasionando uma elevação da temperatura.

Existe, porém, um problema relacionado com a penetração das microondas no material. O que acontece com as microondas não difere do que acontece com outros comprimentos de onda do espectro eletromagnético. A energia eletromagnética incidente sobre um material é,

em parte refletida, em parte absorvida e transmitida para o interior. Desta forma, existem materiais mais ou menos opacos à incidência de microondas.

Podemos perceber que não existe limitação para a temperatura que o material pode atingir, bastando que o aplicador continue aplicando as ondas de alta frequência e que as perdas por irradiação sejam inferiores ao calor gerado no interior do material. Portanto, mesmo com geradores de microondas de baixa potência, pode-se conseguir temperaturas elevadas, desde que o sistema esteja isolado de maneira adequada.

Cabe lembrar que um dos principais atrativos do aquecimento por microondas é que ele não depende da condutividade térmica do material, podendo o aquecimento ser considerado instantâneo. Além disso, o aumento da temperatura interna pode ser considerado homogêneo.

Uma outra vantagem é que é possível conseguir um aquecimento seletivo do material. As regiões que apresentarem maior quantidade de água, por exemplo, sofrerão um aquecimento maior do que as regiões secas. É claro que com o tempo, a tendência é a equalização da temperatura do material graças ao fenômeno da condução que inevitavelmente irá ocorrer, entre a água e o material a ser aquecido. Aliás, é este fenômeno que permite o aquecimento dos alimentos nos fornos de microondas domésticos.

B. O Processo de Aquecimento

Descrevemos o processo de aquecimento como sendo a penetração de energia eletromagnética e a sua posterior conversão em calor dentro do material.

O processo em questão não se aplica, portanto, a metais, já que campos de elevada frequência não penetram nestes materiais. No entanto, este processo de aquecimento pode ser aplicado, com muito sucesso, em materiais dielétricos, que além de maus condutores elétricos, são, em geral, maus condutores térmicos.

Para saber se o material pode ser aquecido ou não por microondas, basta que tenhamos conhecimento de sua estrutura molecular. Todas as moléculas são eletricamente neutras mas os centros de gravidade das cargas positivas e negativas podem não ser coincidentes. Caso eles sejam coincidentes, temos uma molécula apolar. Caso contrário, temos uma molécula polar.

As moléculas polares, comportam-se como dipolos elétricos. Na presença de um campo elétrico, elas tomam um sentido preferencial de orientação. No entanto, esta orientação encontra resistências do meio. Graças a estas resistências é que nós temos a dissipação de ener-

glia através de calor, toda a vez que temos um ciclo de variação do campo elétrico. Mesmo sendo um modelo muito simples, ele nos permite entender as razões pelas quais moléculas polares, como a água, podem ser aquecidas por microondas, enquanto moléculas apolares comportam-se de maneira transparente às microondas.

Existem dois parâmetros que nos permitem determinar se um material se presta ou não ao aquecimento por microondas. O primeiro destes parâmetros é a permissividade ou constante dielétrica (ϵ'), que está associada à energia elétrica armazenada por um material. Um outro parâmetro é o fator de perdas (ϵ''), que está associado à energia dissipada nas mesmas condições. Definindo tangente de perdas da seguinte forma,

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

temos uma relação entre a energia dissipada e a energia armazenada num dielétrico. Quanto maior o valor da tangente de perdas, mais adequado será o material para a secagem através de microondas.

Neste ponto, é importante lembrar que as propriedades dos dielétricos variam com a temperatura e, portanto, devemos levar em conta estas variações quando da análise da possibilidade de se aquecer um determinado material.

C. O Processo de Secagem

A maioria das aplicações de microondas está relacionada com a água. Processos de secagem de papéis, madeiras, cerâmicas ou tecidos, processo de cozimento, desidratação e descongelamento do alimentos, dependem fundamentalmente das propriedades dielétricas da água. A água está entre os dielétricos com os valores mais elevados de tangente de perdas e de ϵ' sendo, portanto, ótima para aquecimento.

Nos processos de secagem, portanto, a energia eletromagnética é utilizada para o aquecimento da água, de tal forma que ocorra a sua mudança de líquido para vapor, permitindo que ela possa abandonar o material que está sendo seco.

D. Equipamento Utilizado no Aquecimento Dielétrico

Os equipamentos utilizados no aquecimento dielétrico incluem geradores e aplicadores.

Os geradores são os equipamentos responsáveis pela conversão da energia elétrica da rede, com frequência de 60 Hz, em microondas, que possuem alta frequência. Costumam apresentar rendimentos variando entre 50% e 75%.

Os aplicadores são os dispositivos que submetem os materiais à ação dos campos eletromagnéticos. Existem uma enorme variedade de aplicadores já que, ainda que existam tipos básicos, para cada processo é necessário que se crie um aplicador específico, a fim de se obter o máximo de transferência de energia eletromagnética para o interior do material que se deseja aquecer. Graças a esta grande variedade, os rendimentos dos aplicadores variam muito.

Pode-se dizer que os rendimentos globais, entre a retirada de energia da rede e o aquecimento do material, podem ser superiores a 50%.

Os aplicadores para microondas mais comuns são constituídos de cavidades retangulares. São caixas com paredes metálicas, no interior das quais é "injetada" a energia eletromagnética, por meio de uma antena. A energia é transmitida para a antena através de uma guia de ondas, que são dutos metálicos dentro dos quais as microondas são refletidas até atingirem a antena e serem lançadas no forno. Nem as paredes da guia nem as paredes do forno são aquecidas pelas microondas pelo fato de serem paredes metálicas, nas quais as microondas tem baixo poder de penetração.

A principal limitação deste tipo de aplicador está relacionada com a geometria interna que dificulta a uniformização do campo elétrico, acarretando diferenças de aquecimento entre diversos pontos dos materiais. Para melhorar a uniformidade provocando-se reflexões internas nos fornos, através de um refletor giratório que muda a geometria interna da cavidade.

O aplicador descrito acima é conhecido como forno de batelada. Existe um outro tipo de forno, o forno contínuo, que permite a obtenção de um aquecimento mais homogêneo e um maior rendimento, visto que, estabilizada a carga, o forno passará a trabalhar em regime permanente.

Nestes tipos de fornos, deve ser tomado um cuidado adicional para impedir que as microondas refletidas saiam pela entrada e pela saída do forno, que permanecem abertas durante todo o processo. A absorção destas microondas refletidas é feita pela utilização de uma camisa d'água ao redor tanto da entrada quanto da saída. Consiste em paredes de acrílico dentro das quais há circulação de água. As microondas incidentes nestas paredes são absorvidas pela água e não conseguem atingir a saída.

12. SECAGEM DE ARGILAS BENTONÍTIAS ATRAVÉS DE MICROONDAS

A. Ensaio de Secagem de Bentonita por Microondas

Foram feitos, no Instituto de Tecnologia Mauá, ensaios para verificar a possibilidade de se aplicar a tecnologia de secagem através de microondas às argilas bentoníticas. Dois aspectos foram considerados: a não alteração das propriedades finais da argila seca, necessárias para a sua comercialização, e a viabilidade econômica, relacionada tanto com o custo de implantação de um sistema de microondas quando com os custos de produção de argila seca através deste método.

Para a realização do ensaio utilizamos o equipamento indicado na figura 10.

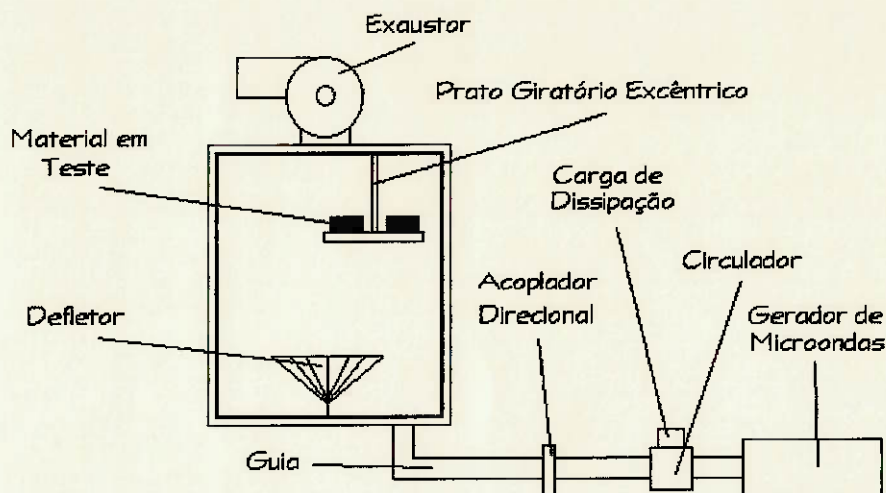


FIGURA 10 - Equipamento para Ensaio de Secagem por Microondas

O equipamento consiste de um forno de microondas, também chamado de aplicador, utilizado para processos por batelada. Dentro do forno encontramos dois dispositivos que tem por objetivo homogeneizar o campo eletromagnético no interior do forno e, conseqüentemente, o aquecimento do material. O primeiro deles é o defletor que, conforme discutido anteriormente, tem como finalidade variar a geometria interna do forno homogeneizando o campo elétrico. O segundo dispositivo é o prato giratório excêntrico que tem como objetivo homogeneizar o aquecimento do material.

Existe ainda um exaustor que retira o ar úmido de dentro do forno, o acoplador direcional, que mede a potência fornecida e a potência refletida durante os ensaios e o circulador, que

impede que as microondas refletidas atinjam o gerador microondas. O circulador apresenta, internamente, ferrita, um elemento não recíproco que desvia as microondas que retornam pela guia em direção à carga de dissipação.

B. Metodologia para Comparação de Resultados

Para podermos comparar as secagens por microondas e através de fornos rotativos utilizamos a seguinte metodologia.

a. Recolhemos amostras de argila com as mesmas propriedades físicas e químicas e mesmo teor de umidade;

b. Secamos as amostras até um teor de umidade de 11%, utilizando os dois métodos, sendo que a secagem por meio de fornos rotatórios foi simulada nos laboratórios da empresa;

c. Nos laboratórios da empresa foram feitos ensaios para verificar as propriedades das argilas resultantes dos dois processos de secagem. Estes ensaios seguem normas que estão apresentadas no Anexo IV.

d. Foram levantados os custos de secagem da argila através da utilização de microondas para posterior comparação com os custos atuais da empresa, caso a argila seca desta maneira tenha propriedades satisfatórias.

C. Metodologia do Ensaio de Secagem por Microondas

Foram realizados dois ensaios com o objetivo de levantar uma curva de seca para a bentonita em fornos de microondas.

O primeiro ensaio foi feito com o intuito de conhecer o comportamento do material, quando submetido à secagem através de microondas. As amostras de argila, em dois recipientes diferentes e com umidades iniciais de 31.3% e 30.87%, foram secas até um teor de umidade de 4.43% e 4.76%, respectivamente.

No segundo ensaio, o objetivo era o de secar a argila até uma umidade de aproximadamente 11%, umidade com a qual ela deixa os secadores rotativos da empresa, para que pudéssemos comparar os custos de secagem dos dois processos. Estas amostras entraram com teor de umidade de 31.3% e 30.87% e saíram do forno com teores de umidade de 9.99% e 11.13%, respectivamente. A última amostra é a mais indicada para que possamos fazer uma comparação entre os custos de secagem.

Os ensaios, foram feitos com interrupções de 1 minuto de duração para cada 5 minutos de secagem. Tais interrupções eram feitas com o objetivo de pesar as amostras e registrar as suas temperaturas, para que pudéssemos determinar qual o teor de umidade da argila naquele instante.

O resultado dos dois processos estão apresentados nas tabelas 3 e 4.

Potência (kW)		Forma	Peso Bruto (g)	PLíquido (g)	Perda (g)	Perda (%)	T (°C)	t1 (min)	t2 (min)
1	transferida	1,2	F1	1696	1511				
	refletida	0,2	F2	1774	1601				
2	transferida	1,2	F1	1683	1498	13	0,86	60	1 5
	refletida	0,2	F2	1763	1590	11	0,69	60	1 5
3	transferida	1,2	F1	1647	1462	36	2,38	83	1 5
	refletida	0,2	F2	1729	1556	34	2,12	88	1 5
4	transferida	1,2	F1	1580	1395	67	4,43	90	1 5
	refletida	0,2	F2	1666	1493	63	3,94	94	1 5
5	transferida	1,2	F1	1540	1355	40	2,65	93	1 5
	refletida	0,2	F2	1623	1450	43	2,69	93	1 5
6	transferida	1,2	F1	1487	1302	53	3,51	92	1 5
	refletida	0,2	F2	1567	1394	56	3,50	94	1 5
7	transferida	1,2	F1	1434	1249	53	3,51	95	1 5
	refletida	0,2	F2	1510	1337	57	3,56	92	1 5
8	transferida	1,2	F1	1381	1196	53	3,51	>105	1 5
	refletida	0,2	F2	1452	1279	58	3,62	>105	1 5
9	transferida	1,2	F1	1333	1148	48	3,18	>105	1 5
	refletida	0,2	F2	1400	1227	52	3,25	>105	1 5
10	transferida	1,2	F1	1290	1105	43	2,85	>105	1 5
	refletida	0,2	F2	1356	1183	44	2,75	>105	1 5
TOTAL			F1				26,87		9 45
			F2				26,11		9 45

Tabela 3 - Resultados do Primeiro Ensaio Realizado

Potência (kW)		Forma	Peso Bruto (g)	PLíquido (g)	Perda (g)	Perda (%)	T (°C)	t1 (min)	t2 (min)
1	transferida	1,2	F3	1803	1630				
	refletida	0,2	F4	1797	1612				
2	transferida	1,2	F3	1796	1623	7	0,46	51	1 5
	refletida	0,2	F4	1789	1604	8	0,50	49	1 5
3	transferida	1,2	F3	1762	1589	34	2,25	92	1 5
	refletida	0,2	F4	1757	1572	32	2,00	92	1 5
4	transferida	1,2	F3	1706	1533	56	3,71	95	1 5
	refletida	0,2	F4	1704	1519	53	3,31	93	1 5
5	transferida	1,2	F3	1648	1475	58	3,84	94	1 5
	refletida	0,2	F4	1647	1462	57	3,56	95	1 5
6	transferida	1,2	F3	1589	1416	59	3,90	94	1 5
	refletida	0,2	F4	1591	1406	56	3,50	95	1 5
7	transferida	1,2	F3	1534	1361	55	3,64	99	1 5
	refletida	0,2	F4	1533	1348	58	3,62	95	1 5
8	transferida	1,2	F3	1481	1308	53	3,51	>105	1 5
	refletida	0,2	F4	1481	1296	52	3,25	>105	1 5
TOTAL			F3			21,31		7	35
			F4			19,74		7	35

Tabela 4 - Resultados do Segundo Ensaio Realizado

D. Resultados da Secagem por Microondas

Com os dados obtidos no primeiro ensaio realizado, que é mais abrangente, podemos montar a curva de secagem, conforme mostrado na figura 11.

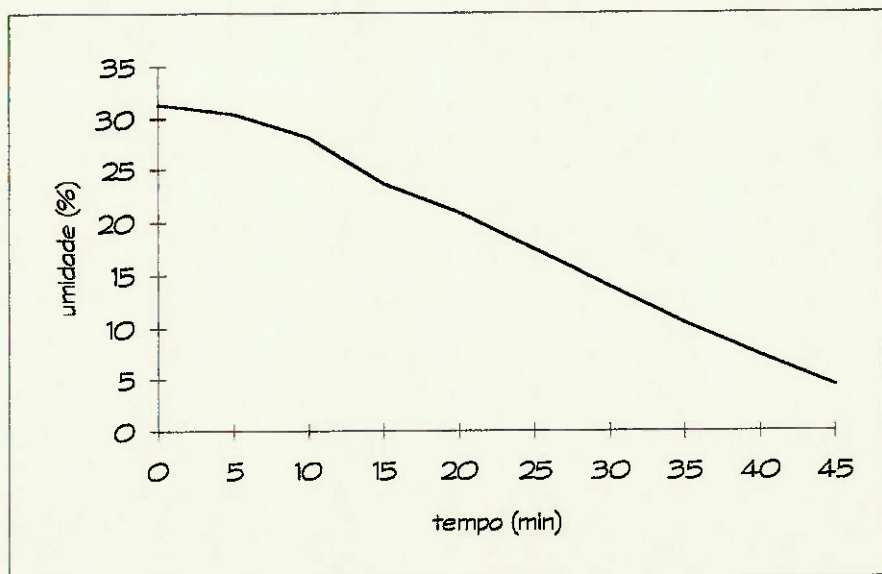


FIGURA 11 - Curva de Secagem de Argila Bentonítica em Fornos Microondas

Pela curva de secagem, podemos observar que a taxa de evaporação é aproximadamente constante ao longo de todo o processo. Para verificar isto, elaboramos o gráfico mostrado na figura 12.

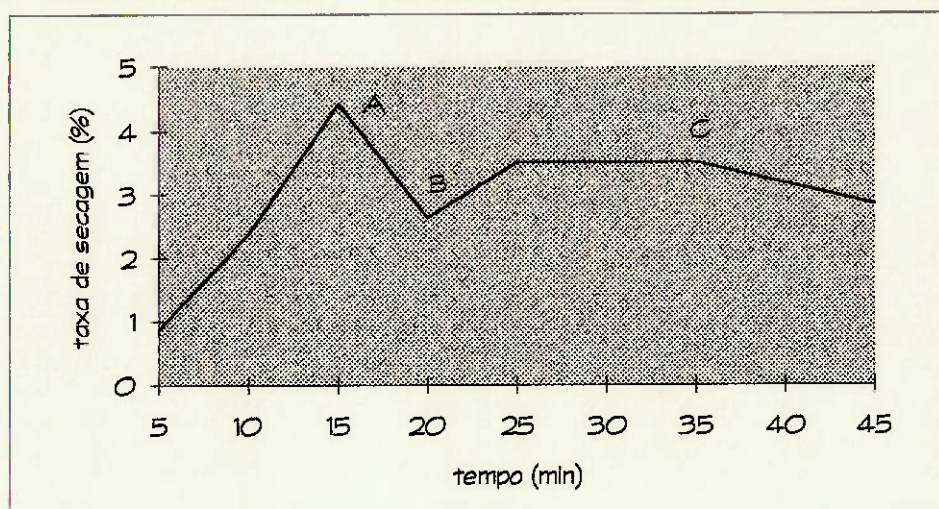


FIGURA 12 - Taxa de Secagem no Microondas

Neste gráfico podemos observar que a taxa de secagem é menor no início do processo. Conforme aumentamos a temperatura da água no interior da argila, a taxa de secagem também aumenta. No entanto, a partir do ponto A, a taxa de secagem passa a depender mais de fenômenos difusivos do que do aumento de temperatura e ela se estabiliza em um patamar, se mantendo constante até que atinja o ponto C.

A partir deste ponto, o teor de água na argila se torna baixo e faz com que a taxa de evaporação seja reduzida.

Deve ocorrer um decaimento exponencial da taxa de umidade, segundo o modelo da figura 7. Até a umidade relativa de 10%, a taxa de evaporação é constante. Por causa disto, consideramos o valor de K_r , no nosso modelo de cálculo da umidade através do cilindro rotativo, como sendo igual a uma constante menor do que um.

Também a partir dos dados das tabelas 3 e 4 montamos a tabela 5, para análise dos ensaios realizados:

	M. Amostra (g)	Umid. Inicial (%)	Perda (%)	Umid. Final (%)	Tempo (h)	P _{Total} (kWh)	P _{Util} (kWh)	Rend. (%)	Custo (R\$/ton)
F1	1208,8	31,30	26,87	4,43	0,75	0,90	0,75	83,33	96,79
F2	1280,8	30,87	26,11	4,76	0,75	0,90	0,75	83,33	91,35
F3	1304	31,30	21,31	9,99	0,58	0,70	0,58	83,33	69,79
F4	1289,6	30,87	19,74	11,13	0,58	0,70	0,58	83,33	70,56

Tabela 5 - Análise dos Ensaios Realizados

D1. Custos Envolvidos no Processo

Os custos para secagem por microondas foram obtidos multiplicando a potência transferida pelo tempo de duração do ensaio, obtendo a potência total em kWh. Este valor de potência foi multiplicado pelo preço do kWh, R\$ 0.065, e dividido pela massa da amostra, sendo multiplicado por 10^6 para saber o custo por tonelada, já que a massa da amostra estava em gramas. O resultado final foi multiplicado por 2 pois a gerador de microondas tem um rendimento de 50%.

É importante salientar que caso a argila seja seca industrialmente através de microondas, será desenvolvido um forno de secagem contínua específico para este material, que terá um rendimento melhorado em até 100%.

Os custos envolvidos com a secagem por microondas por si só, já são maiores do que o custo de secagem total da empresa. Portanto, não foi necessário levantar os custos de manutenção e instalação de um sistema de microondas, o que também seria muito difícil por se tratar de um equipamento experimental.

D2. Qualidade da Argila Obtida

A partir dos ensaios realizados pela empresa, pudemos montar a tabela 6, que nos fornece uma comparação entre as amostras secadas por fornos rotativos e as amostras secadas através de microondas.

Quando secamos as amostras no moinho, ele absorve umidade de tal forma que a umidade com a qual a argila foi testada é maior do que a umidade com a qual ela saiu do processo de secagem por microondas. Isto ocorreu pois para as amostras com muito pouca umidade, a argila absorve água do ambiente com maior facilidade.

Amostra	Seca em C. Grande		Seca em Estufa do Laboratório da BUN		Seca por Microondas no Laboratório de Inst. de Tecnologia Mauá			
Cod Lab /SP	OS/533/96		OS/534/96		OS/547	OS/548	OS/549	OS/550
Cod Amost	1	2	1	2	1	2	3	4
PROPRIEDADES ESPECÍFICAS								
Umid. Am. Granulada (%)	10,00	9,97	9,83	10,50	4,28	4,57	12,73	12,41
Umid. Am. Moída (%)	8,99	8,30	8,10	8,93	8,73	8,18	9,60	9,92
Inchamento (ml)	28,00	28,00	20,00	24,00	19,00	19,00	20,00	20,00
Ads. de Azul Metil (ml)	47,82	46,17	47,27	46,17	47,17	46,72	46,72	46,17
# + 200 mesh (%)	14,10	14,40	15,30	13,80	15,90	14,80	13,80	13,20
PERFURAÇÃO NORMA PETROBRÁS - TIPO I								
Concentração (%)	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63
Visc. Aparente (cP)	10,50	12,00	6,00	7,00	5,00	5,00	6,00	6,50
Visc. Plástica (cP)	4,00	5,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
pH	9,81	9,79	9,53	9,62	9,39	9,42	9,46	9,47
Filtrado (ml)	19,30	19,20	24,62	21,40	23,50	22,50	21,70	19,30

Tabela 6 - Resultados Comparativos entre os Dois Processos

Uma das características da argila, a viscosidade aparente, está fora dos padrões estabelecidos pela norma da Petrobrás, que diz que ela deve estar entre 15 e 20 cP. Isto nos leva a concluir que a argila passou por algum processo que alterou a sua qualidade. Dessa forma, foi necessário que realizássemos um outro teste para verificar se a secagem por microondas não alterou esta propriedade.

Pegamos um outro tipo de argila, ativada em laboratório, para fazer um novo teste. As amostras eram menores, em torno de 200 gramas. Além de verificar a viscosidade plástica, queríamos verificar se a retirada da umidade da argila a partir de teores abaixo de 8%, alterava a sua qualidade final.

Secamos uma das amostras totalmente e, a partir do tempo que foi gasto para secar esta amostra, secamos amostras por um tempo menor até obter 4 amostras com teores finais de umidade de 0%, 1.26%, 6.22% e 13.84%. Os resultados destes ensaios de verificação de propriedades estão apresentados na tabela 7.

Novamente observamos que as argilas com baixo teor de umidade absorviam muita umidade do ambiente durante o processo de moagem. Quanto ao inchamento, observamos que este tipo de argila, o chocobofoe Juá, secado em estufa, tem como inchamento mínimo 30 ml, isto significa que as amostras S.361 e S.360 não passaram pelo teste de inchamento.

Amostra	Seca em Estufa do Laboratório da BUN		Seca por Microondas no Laboratório do Inst. de Tecnologia Mauá			
Cod Lab /SP			S.361	S.360	S.359	S.358
Cod Amost	1	2	1	2	3	4
Temp. Sec (°C)	80	110				
Tempo Sec (min)	240	40				
PROPRIEDADES ESPECÍFICAS						
Umid. Am. Moída (%)	12.67	11.48	6.40	6.16	9.89	15.13
Inchamento (ml)	38	30	21.00	20.00	32.00	47.00
Ads. de Azul Metil (ml)	58.15	57.94	57.17	57.17	57.72	58.26
# + 200 mesh (%)	10.50	10.08	8.90	9.80	9.40	9.00
PERFURAÇÃO NORMA PETROBRÁS - TIPO I						
Concentração (%)	4.63	4.63	4.63	4.63	4.63	4.63
Visc. Aparente (cP)	24.00	16.00	5.00	4.50	9.50	16.50
Visc. Plástica (cP)	6.00	4.00	3.00	3.00	5.00	7.00
pH	10.08	10.04	9.96	9.90	9.88	9.88
Filtrado (ml)	20.70	21.54	28.26	28.12	22.38	19.30

Tabela 7 - Resultados dos Ensaios de Verificação de Propriedades

A viscosidade aparente mínima é de 15 cP, exigido pela Petrobrás, sendo que as amostras S.361, S.360 e S.359 não passaram pelo teste. A viscosidade plástica tem como valor mínimo aceitável 4 cP. Assim sendo, as amostras S.361 e S.360 não passaram pelo teste.

Podemos perceber que quando os teores de umidade são muito reduzidos nas argilas, durante o processo de secagem, as propriedades destas argila ficam comprometidas. Isto se deve ao fato de que retiramos água da estrutura da argila e isto altera estas propriedades.

A umidade mínima que pode ser retirada, sem que se alterem as propriedades é de 8%. Abaixo deste teor de umidade, as propriedades da argila já começam a ficar comprometidas. Não há, no entanto, nenhum indício de que a secagem do microondas, respaldada as faixas de teor de umidade, altera as propriedades da argila.

Portanto, a secagem de argilas bentoníticas através de microondas é um processo viável do ponto de vista físico-químico, dependendo apenas dos custos envolvidos.

13. ANÁLISES E CONCLUSÕES DO TRABALHO

Para a análise do processo de secagem, utilizamos dois modelos: um para o cálculo do tempo de retenção e outro para o cálculo da transferência de massa e calor ao longo do cilindro. O modelo do tempo de retenção foram adaptados de outros modelos utilizados na secagem de madeira e de fertilizantes. Existiam, portanto, parâmetros que precisavam ser ajustados para que obtivéssemos um modelo adequado para a secagem de argila. No entanto, não dispúnhamos de dados experimentais suficientes para verificar a adequabilidade e a faixa de utilização deste modelo.

Nas figuras de 13 a 18, temos os gráficos de sensibilidade do tempo de retenção em função dos vários parâmetros analisados. Estes gráficos foram elaborados variando-se o parâmetro para o qual queríamos fazer a análise de sensibilidade e mantendo-se os demais constantes. Dessa forma, obtivemos seis gráficos, um para cada parâmetro analisado, que indica a sensibilidade do tempo de retenção em função destes diversos parâmetros. Estes gráficos indicam tendências, que podem ser utilizadas para determinar futuras otimizações do processo de secagem.

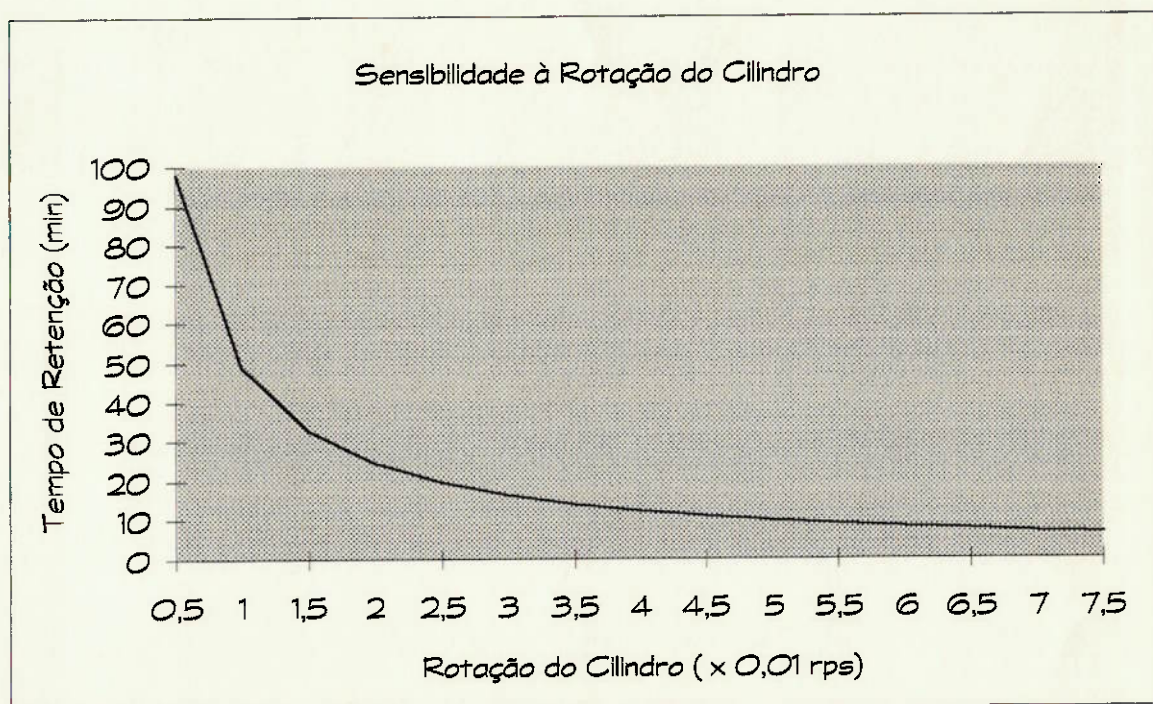


FIGURA 13 - Sensibilidade à Rotação do Cilindro

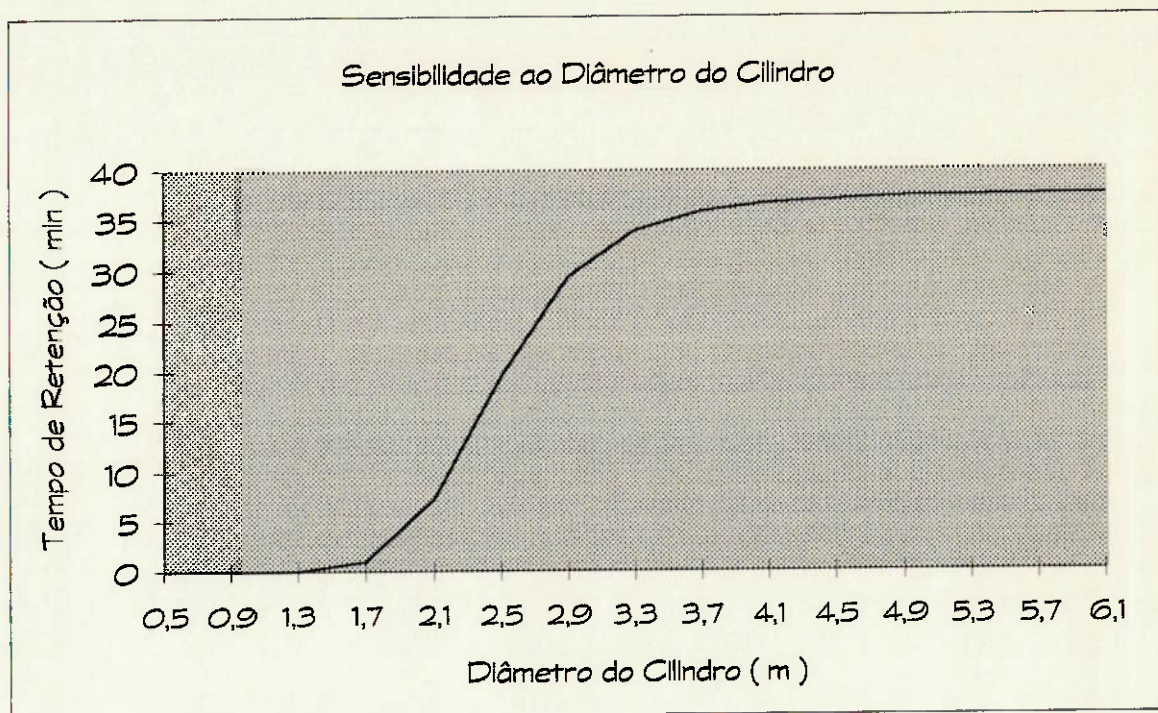


FIGURA 14 - Sensibilidade ao Diâmetro do Cilindro

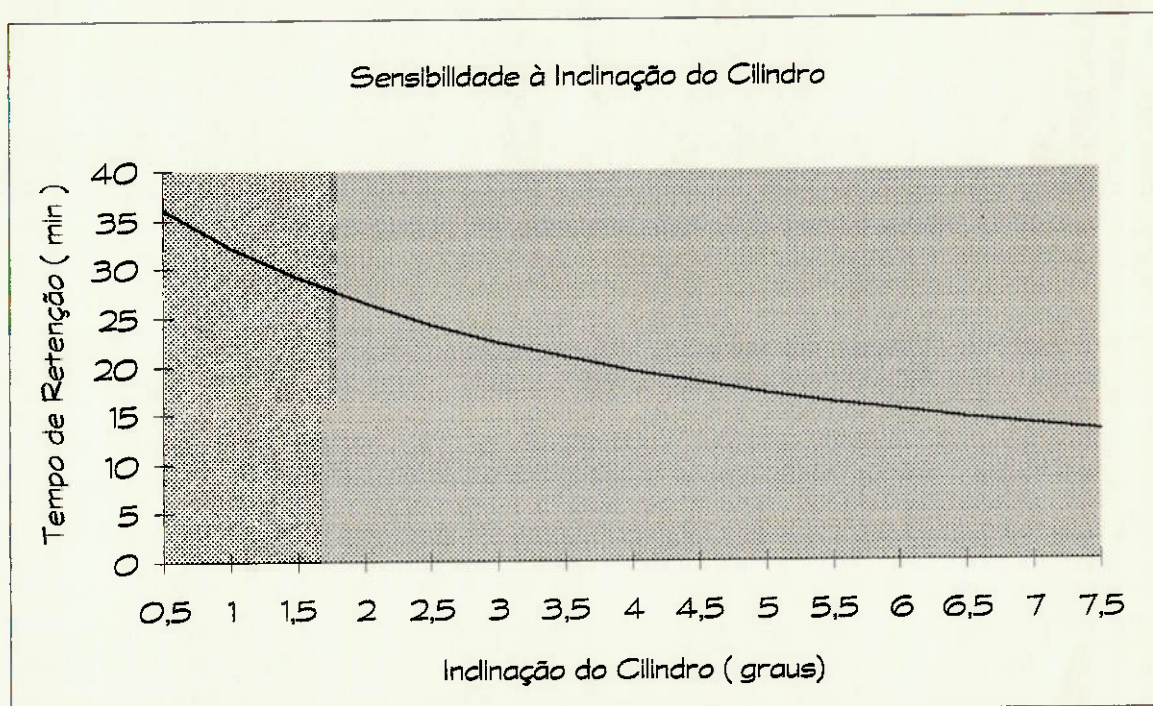


FIGURA 15 - Sensibilidade à Inclinação do Cilindro

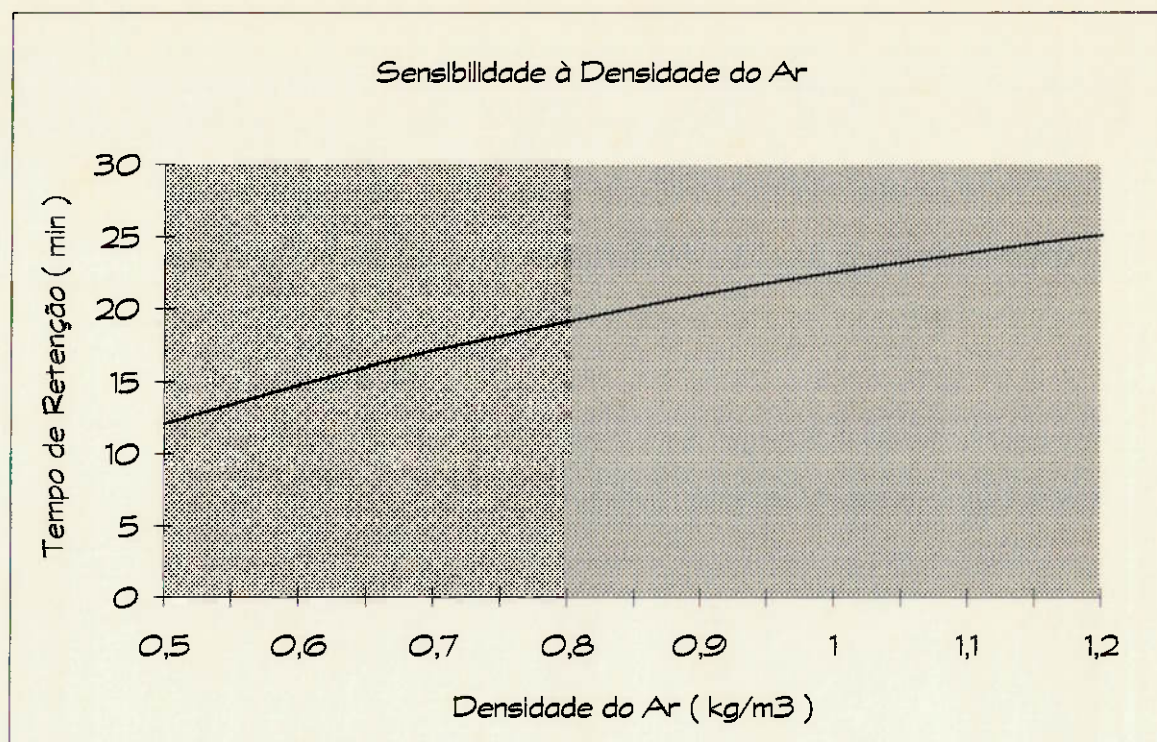


FIGURA 16 - Sensibilidade à Densidade do Ar

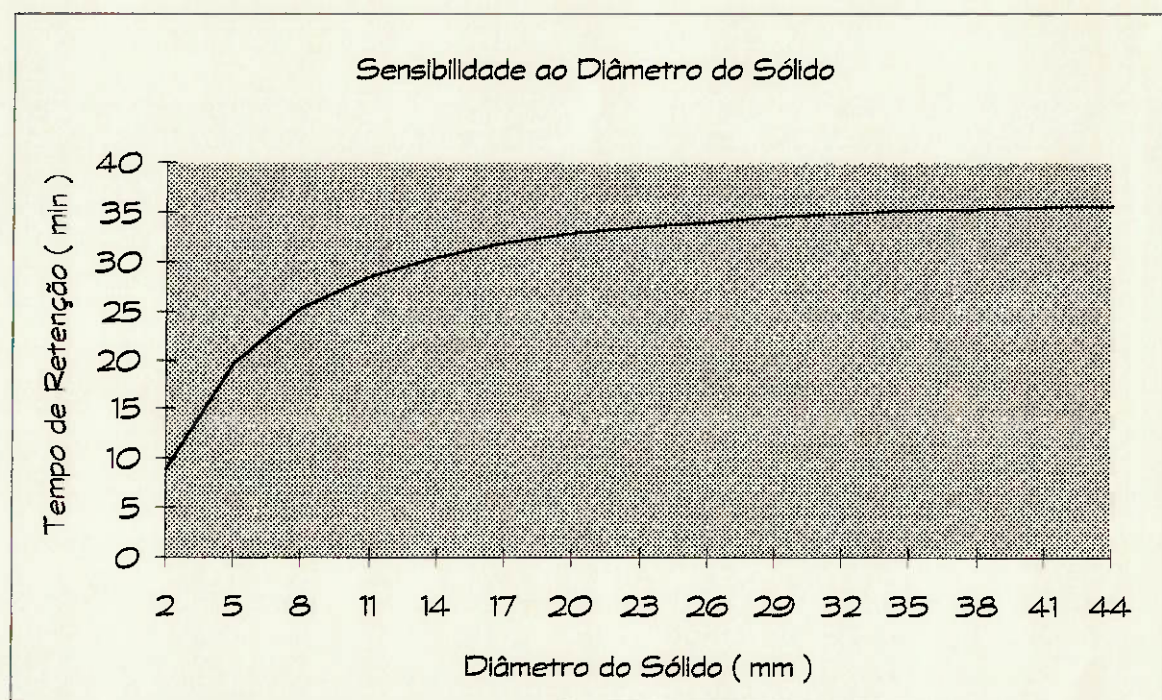


FIGURA 17 - Sensibilidade ao Diâmetro do Sólido

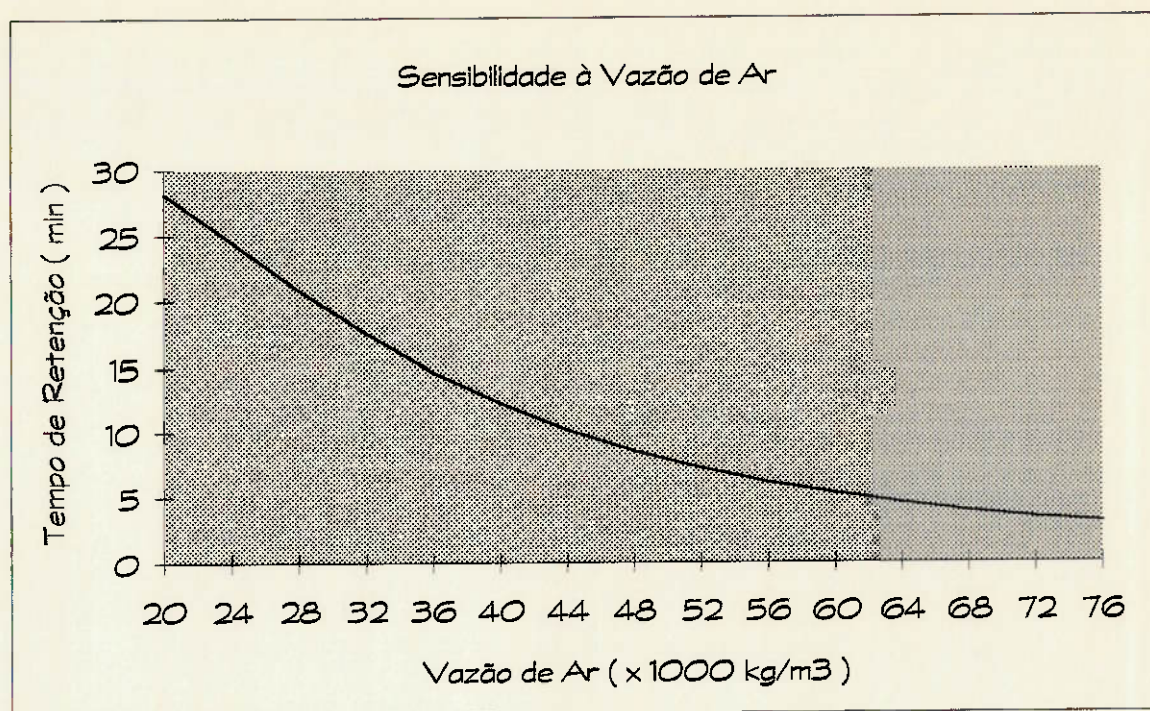


FIGURA 18 - Sensibilidade à Vazão de Ar

O processo de otimização tem como objetivo a redução dos custos de secagem através da variação dos parâmetros utilizados no modelo do tempo de retenção. No entanto, a variação destes parâmetros terá influência na curva de secagem da figura 19. Portanto, para que seja possível otimizar o processo, seria necessária uma análise conjunta, de tal forma que pudessemos variar estes parâmetros e analisar a nova curva de secagem obtida para verificar se houve ou não uma melhora.

Uma outra possibilidade para reduzir os custos de secagem, era diminuir a quantidade de óleo queimado, fazendo com que a argila saísse do secador com 16% de umidade. O restante seria secado durante o posterior processo de moagem, em moinhos do tipo Raymond. O rendimento seria muito maior pois a relação área volume é muito maior no moinho.

No moinho, deve-se injetar ar quente, que irá retirar a umidade da argila. Como a argila vai estar um pouco mais úmida, o rendimento do moinho irá cair um pouco, e deve ser feita uma análise para verificar se há vantagem na adoção deste sistema.

Além disso, existe a necessidade de se instalar um ciclone no escape do ar quente, de tal forma que ele separe o ar que está saindo de partículas de argila que serão, inevitavelmente, transportadas.

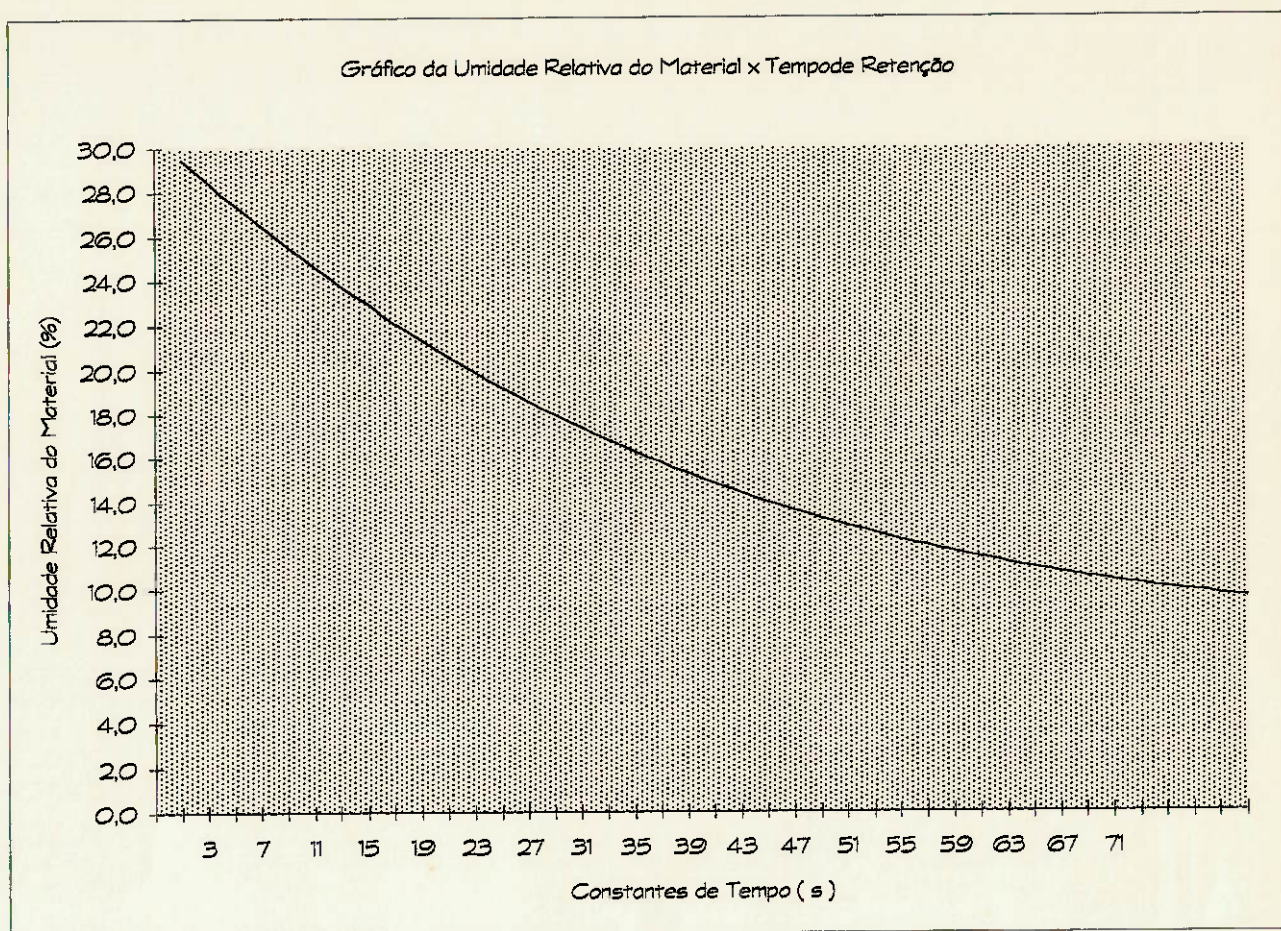


FIGURA 19 - Umidade Relativa em Função do Tempo de Retenção

Existe também a possibilidade de projetarmos um regenerador para aproveitar o calor dos gases que deixam o cilindro do secador, para preaquecer o ar de entrada, aumentando o rendimento térmico do processo. Com este aumento da temperatura de entrada do ar, conseguiríamos uma maior temperatura de entrada dos gases de combustão. Como esse aumento de temperatura é desnecessário, podemos reduzir a quantidade de combustível queimada, reduzindo os custos.

Outro ponto que podemos mexer é a geometria interna do cilindro. Existem diversas geometrias internas que podem ser utilizadas. Existem palhetas radiais, com dobras de 45° , com dobras de 90° , que é o nosso caso, casco do cilindro com diafragmas e com palhetas no centro do cilindro. Cada um destes tipos é mais adequado para um determinado material. No entanto, para seleccionar melhor o tipo de palheta, seriam necessários dados experimentais dos quais não dispomos.

Com relação ao microondas, pudemos constatar que é possível a sua utilização para secar argilas bentoníticas sem danificar a qualidade do material. Isto foi feito na realização de ensaios de secagem pioneiros com o objetivo de verificar a possibilidade de utilização de novas tecnologias em processos industriais já existentes.

Existem, contudo, algumas restrições a este tipo de secagem que devem ser observadas. Não se deve reduzir a umidade da argila a menos do que 8%, pois isto prejudica algumas propriedades fundamentais para a sua utilização industrial.

É importante salientar que os custos resultantes deste tipo de secagem são profundamente restritivos, e inviabilizam a sua utilização atual. Apesar disso, a secagem por microondas apresenta uma grande vantagem que é a de não ocorrer contaminação do material secado por gases de provenientes da queima de combustível. Caso os custos da energia elétrica sejam reduzidos, os custos do combustível queimado aumentem, ou seja necessário que se reduza a contaminação do material pelos gases de combustão, o microondas se torna um processo extremamente interessante.

Por fim, com a elaboração deste trabalho, conseguimos entender como se dá o processo de secagem em secadores rotativos e o quão complexo é analisar e modelar este processo, para que seja possível propor melhorias.

Por isso, apesar de não termos conseguido propor as melhorias que pretendíamos propor, no início do trabalho, achamos que a elaboração deste foi extremamente interessante e enriquecedora, do ponto de vista da obtenção de novos conhecimentos relacionados com a nossa área de trabalho.

Esperamos que futuramente se dê continuidade a este trabalho para que as análises elaboradas possam ser refinadas e completadas com dados experimentais e para que as melhorias possam ser realmente efetuadas.

14. BIBLIOGRAFIA

A. Artigos

GLINKIN, P. G. and SHARPLES, A. R. I. C. - Computer Simulation of Rotary Dryers, Trans Instn Chem Engrs, Vol. 42, 1964.

GLINKIN, P. G. - Transport of Solids Through Flighted Rotating Drums, Trans Instn Chem Engrs, Vol. 56, 1978.

KAMKE, F. A. and WILSON, J. B. - Computer Simulation of a Rotary Dryer, AIChE Journal, Vol. 32 nº2, 1986.

SCHOFIELD, B. S. - Rotary Dryers and Coolers for Granular Fertilizers, Trans Instn Chem Engrs, Vol. 40, 1962.

SENISE, José Thomaz - A Utilização de Rádio Frequência e Microondas na Eletrotermia Industrial, Revista Brasileira de Engenharia Química, Vol. 8 nº1, Julho/Setembro, 1985.

B. Livros

GRIM, Ralph E. - Applied Clay Mineralogy, McGraw-Hill Book Company, 1962.

GRIM, Ralph E. - Revista Cerâmica, Propriedades das Argilas, Volume IX, nº35, setembro, 1963.

INCROPERA, Frank P. - Fundamentos da Transferência de Calor e Massa, Guanabara - Koogan, 1992.

McCABE, Warren L. and SMITH, Julian C. - Unit Operations of Chemical Engineering, McGraw-Hill, 1956.

McNAUGHTON, Kenneth J. - The Chemical Engineering Guide to Heat Transfer - Equipment, Volume II, McGraw-Hill, 1986.

PERA, Hildo - Geradores de Vapor, Fama, 1990.

PERRY, Robert H. and CHILTON, Cecil H. - Chemical Engineers' Handbook - 5º Edition, McGraw-Hill Kogakusha Ltda, 1973.

PIMENTA, Marcos de M. - Apostila de Transferência de Massa, 1995.

ROHSENOW, W. M. and CHOI, H. Y. - Heat, Mass and Momentum Transfer, Prentice-Hall, 1961.

SANTOS, Pêrsio de Souza - Tecnologia de Argilas Aplicada às Argilas Brasileiras - Fundamentos, Volume 1, Edgard Blücher, 1975.

SANTOS, Pêrsio de Souza - Tecnologia de Argilas Aplicada às Argilas Brasileiras - Aplicações, Volume 2, Edgard Blücher, 1975.

VAN WYLEN, Gordon - Fundamentos da Termodinâmica Clássica, Edgard Blücher, 1995.

ANEXO I - CÁLCULOS RELATIVOS AO BALANÇO DE MASSA E AOS BALANÇOS TÉRMICOS DO SECADOR

Nas tabelas abaixo estão apresentados os resultados dos balanços de massa e térmico, feitos com o objetivo de determinar a temperatura dos gases na entrada e na saída do cilindro, necessários para a elaboração do modelo de tempo de retenção e de variação da umidade ao longo do cilindro.

Para calcular esta temperatura foi necessário efetuar um balanço de massa determinando a composição dos gases de escape, para, através da massa da entalpia de cada um dos componentes, pudéssemos fazer o balanço de energia, que foi dividido em duas partes, uma no forno, onde ocorre a queima do combustível e outra no cilindro. Com isso, determinamos as temperaturas de entrada e saída dos gases no cilindro.

MASSA DE AR TEÓRICA E FATOR DE EXCESSO DE AR

Dados do Combustível - Óleo BPF-1A

Teores	(%)
C	87,0
H	10,0
S	0,7
Z	2,2
W	0,1

Reações de Queima

C	C+O ₂ =CO ₂		
	12,0	32,0	44,0
	1,0	2,7	3,7
H	H ₂ +O=H ₂ O		
	2,0	16,0	18,0
	1,0	8,0	9,0
S	S+O ₂ =SO ₂		
	32,0	32,0	64,0
	1,0	1,0	2,0

PC	kcal/kg	KJ/Kg
Superior	10200,0	42636,0
Inferior	9650,0	40337,0

Mcomb=	187,6	Kgc/hr
MO ₂ =	3,1	KgO ₂ /Kgc

Mart=	13,4	Kgar/Kgc
Mart=	2523,1	Kgar/hr
Marr=	29527,6	Kgar/hr

Fator de Excesso de ar

n= 11,7

BALANÇO TÉRMICO NO FORNO

Ar	TBS=	30,0	°C	Mt=	30000,0	kg/hr
	Umid. Rel.=	60,0	%	Mar=	29527,6	kg/hr
	w=	0,016	Kgum/Kgar	Mágua=	472,4	kg/hr

cpágua=	4,2	KJ/kgK	hágua=	21,0	KJ/kg
cpar=	1,0	KJ/kgK	har=	5,0	KJ/kg

Combustível	M=	187,6	kg/hr
	PCI=	40400,0	KJ/kg

CO2	MC=	163,2	Kg/hr
	MO2=	435,2	Kg/hr
	MCO2=	598,4	Kg/hr

C+O2=CO2		
12,0	32,0	44,0
163,2	435,2	598,4

H2O	MH=	18,8	Kg/hr
	MO2=	150,4	Kg/hr
	MH2O=	169,2	Kg/hr

H2+O=H2O		
2,0	16,0	18,0
18,8	150,4	169,2

SO2	MS=	1,3	Kg/hr
	MO2=	1,3	Kg/hr
	MSO2=	2,6	Kg/hr

S+O2=SO2		
32,0	32,0	64,0
1,3	1,3	2,6

Gases	Mar=	29527,6	Kg/hr
Inertes	MIN2=	22736,2	Kg/hr
	MO2=	6791,3	Kg/hr
	MO2r=	6204,4	Kg/hr

Entalpias	TsGases=	262,4	°C
	cpCO2=	0,8	KJ/kgK
	cpáguaq=	4,2	KJ/kgK
	cpáguaar=	4,2	KJ/kgK
	cpN2=	1,0	KJ/kgK
	cpO2=	0,9	KJ/kgK

hCO2=	199,9	KJ/kg
háguaq=	992,4	KJ/kg
háguaar=	992,4	KJ/kg
hN2=	247,3	KJ/kg
hO2=	218,8	KJ/kg

Balanço	Entrada=	2149,0
	Saída=	2149,0

BALANÇO TÉRMICO NO CILINDRO

Argila Úmida	Umidade=	31,0	%	Margs=	5658,0	kg/hr
	Margu=	8200,0	kg/hr	Mágua=	2542,0	kg/hr
	Tentrada=	30,0	°C			

cpargila=	0,9	KJ/kgK	hargila=	4,4	KJ/kg
cpágua=	4,2	KJ/kgK	hágua=	21,0	KJ/kg

Argila Seca	Umidade=	13,0	%	Margu=	6503,4	kg/hr
	Margs=	5658,0	kg/hr	Mágua=	845,4	kg/hr
	Tsaída=	90,0	°C			

cpargila=	0,9	KJ/kgK	hargila=	57,2	KJ/kg
cpágua=	4,2	KJ/kgK	hágua=	272,4	KJ/kg

Gases Secos (mesmo do item anterior)

Gases Úmidos

TsGases=	210,0	°C			
cpCO2=	0,8	KJ/kgK	hCO2=	155,7	KJ/kg
cpáguaq=	4,2	KJ/kgK	hágua=	773,3	KJ/kg
cpáguaor=	4,2	KJ/kgK	hágua=	773,3	KJ/kg
cpN2=	1,0	KJ/kgK	hágua=	192,7	KJ/kg
cpO2=	0,9	KJ/kgK	hágua=	170,5	KJ/kg

Água Evaporada	mevap=	1696,6	kg/hr			
	cpágua=	4,2	KJ/kgK	hágua=	775,2	KJ/kg

Balanço	Entrada=	2170,7
	Saída=	2171,1

ANEXO II - CÁLCULOS RELATIVOS À UMIDADE NA SAÍDA DO CILINDRO

Diâmetro da Partícula	0,005	m	Massa da Partícula Inicial	0,14	g
Vazão Mássica	29409	kg/h	Massa da Partícula Seca	0,10	g
Diâmetro do Cilindro	2,5	m	Densidade da Partícula	2,1	g/cm ³
Difusiv do Gás a 298 K	2,6E-05	m ² /s	Cálc da Massa da Partícula	0,14	
Vazão Mássica Argila	5400	kg/h	Temp de Saída dos Gases	120	°C
Tempo de Queda	0,57	s	Temp de Entr dos Gases	262	°C
Tempo de Cascata	20,57	s	Cálculo do Coeficiente "a"	0,01	

Número da Cascata	Temp. (C)	Densidade (kg/m ³)	Viscosidade Dinâmica (u)	Viscosidade (v)	Vazão de Ar (m ³ /h)	Velocidade (m/s)	Re	Diffusibilidade dos Gases (m ² /s)	Sc	Gr	Coef. de Trans. de Massa (m/s)	Concentração de Água nos Gases (kg/m ³)
0	262,0	0,65	2,83E-05	4,35E-05	45,316	6,3	720	2,14E-05	2,0	35,5	2,41E-01	1,44E-02
1	258,4	0,65	2,82E-05	4,30E-05	45,033	6,2	724	2,10E-05	2,0	35,7	2,37E-01	1,57E-02
2	254,9	0,66	2,80E-05	4,25E-05	44,750	6,2	727	2,06E-05	2,1	35,8	2,34E-01	1,69E-02
3	251,5	0,66	2,79E-05	4,20E-05	44,468	6,1	731	2,02E-05	2,1	35,9	2,30E-01	1,82E-02
4	248,0	0,67	2,78E-05	4,16E-05	44,187	6,1	734	1,97E-05	2,1	36,0	2,26E-01	1,94E-02
5	244,7	0,67	2,77E-05	4,11E-05	43,907	6,1	738	1,93E-05	2,1	36,1	2,22E-01	2,05E-02
6	241,3	0,67	2,76E-05	4,07E-05	43,629	6,0	741	1,89E-05	2,1	36,2	2,19E-01	2,17E-02
7	238,0	0,68	2,74E-05	4,02E-05	43,353	6,0	744	1,86E-05	2,2	36,3	2,14E-01	2,28E-02
8	234,8	0,68	2,73E-05	3,98E-05	43,078	6,0	748	1,82E-05	2,2	36,3	2,11E-01	2,39E-02
9	231,6	0,69	2,72E-05	3,94E-05	42,805	5,9	751	1,78E-05	2,2	36,4	2,07E-01	2,50E-02
10	228,5	0,69	2,71E-05	3,90E-05	42,535	5,9	754	1,75E-05	2,2	36,4	2,03E-01	2,60E-02
11	225,3	0,70	2,70E-05	3,85E-05	42,266	5,8	757	1,71E-05	2,3	36,4	1,99E-01	2,70E-02
12	222,3	0,70	2,68E-05	3,81E-05	42,000	5,8	761	1,67E-05	2,3	36,4	1,96E-01	2,80E-02
13	219,3	0,70	2,67E-05	3,78E-05	41,737	5,8	764	1,64E-05	2,3	36,4	1,92E-01	2,90E-02
14	216,3	0,71	2,66E-05	3,74E-05	41,476	5,7	767	1,61E-05	2,3	36,4	1,89E-01	2,99E-02
15	213,3	0,71	2,65E-05	3,70E-05	41,218	5,7	770	1,57E-05	2,3	36,4	1,85E-01	3,08E-02
16	210,4	0,72	2,64E-05	3,66E-05	40,963	5,7	773	1,54E-05	2,4	36,4	1,82E-01	3,17E-02
17	207,6	0,72	2,63E-05	3,62E-05	40,711	5,6	776	1,51E-05	2,4	36,3	1,78E-01	3,26E-02
18	204,7	0,73	2,62E-05	3,59E-05	40,461	5,6	779	1,48E-05	2,4	36,3	1,75E-01	3,35E-02
19	202,0	0,73	2,61E-05	3,55E-05	40,215	5,6	782	1,45E-05	2,4	36,2	1,71E-01	3,43E-02
20	199,2	0,74	2,59E-05	3,52E-05	39,971	5,5	785	1,42E-05	2,5	36,1	1,68E-01	3,51E-02
21	196,5	0,74	2,58E-05	3,48E-05	39,730	5,5	788	1,39E-05	2,5	36,0	1,64E-01	3,59E-02
22	193,8	0,74	2,57E-05	3,45E-05	39,493	5,5	791	1,36E-05	2,5	35,9	1,61E-01	3,67E-02
23	191,2	0,75	2,56E-05	3,42E-05	39,258	5,4	794	1,34E-05	2,6	35,8	1,58E-01	3,74E-02
24	188,6	0,75	2,55E-05	3,38E-05	39,027	5,4	797	1,31E-05	2,6	35,6	1,54E-01	3,82E-02
25	186,0	0,76	2,54E-05	3,35E-05	38,799	5,4	800	1,28E-05	2,6	35,5	1,51E-01	3,89E-02
26	183,5	0,76	2,53E-05	3,32E-05	38,573	5,3	803	1,26E-05	2,6	35,3	1,48E-01	3,96E-02
27	181,0	0,77	2,52E-05	3,29E-05	38,351	5,3	806	1,23E-05	2,7	35,1	1,45E-01	4,03E-02
28	178,5	0,77	2,51E-05	3,26E-05	38,132	5,3	809	1,21E-05	2,7	34,9	1,42E-01	4,09E-02
29	176,1	0,78	2,50E-05	3,23E-05	37,916	5,2	811	1,18E-05	2,7	34,7	1,39E-01	4,16E-02
30	173,7	0,78	2,49E-05	3,20E-05	37,704	5,2	814	1,16E-05	2,8	34,5	1,36E-01	4,22E-02
31	171,3	0,78	2,48E-05	3,17E-05	37,494	5,2	817	1,13E-05	2,8	34,3	1,33E-01	4,28E-02
32	169,0	0,79	2,47E-05	3,14E-05	37,287	5,2	820	1,11E-05	2,8	34,0	1,30E-01	4,34E-02
33	166,7	0,79	2,47E-05	3,11E-05	37,083	5,1	823	1,09E-05	2,9	33,7	1,27E-01	4,40E-02
34	164,4	0,80	2,46E-05	3,09E-05	36,883	5,1	826	1,07E-05	2,9	33,5	1,24E-01	4,46E-02
35	162,2	0,80	2,45E-05	3,06E-05	36,685	5,1	829	1,04E-05	2,9	33,2	1,21E-01	4,51E-02
36	160,0	0,81	2,44E-05	3,03E-05	36,491	5,0	831	1,02E-05	3,0	32,9	1,18E-01	4,57E-02
37	157,8	0,81	2,43E-05	3,01E-05	36,299	5,0	834	1,00E-05	3,0	32,6	1,15E-01	4,62E-02
38	155,7	0,81	2,42E-05	2,98E-05	36,110	5,0	837	9,82E-06	3,0	32,2	1,13E-01	4,67E-02
39	153,6	0,82	2,41E-05	2,95E-05	35,924	5,0	840	9,62E-06	3,1	31,9	1,10E-01	4,72E-02

Vazão Mássica Úmida(Argila)	Coef. de Resistência	Taxa de Evaporação	Massa de Água Evaporada	Massa da Partícula	Umidade Relativa do Material na Entrada da Cascata	Constante de Tempo	Umidade Relativa do Material na Saída da Cascata
(kg/h)		(g/s)	(g/part.)	(g)	(%)		(%)
7.714	0,85	1,81E-03	1,03E-03	0,136	30,0	0	29,5
7.656	0,85	1,76E-03	1,00E-03	0,135	29,5	1	28,9
7.600	0,85	1,71E-03	9,73E-04	0,134	28,9	2	28,4
7.545	0,85	1,66E-03	9,44E-04	0,133	28,4	3	27,9
7.492	0,85	1,61E-03	9,16E-04	0,133	27,9	4	27,4
7.441	0,85	1,56E-03	8,89E-04	0,132	27,4	5	26,9
7.391	0,85	1,51E-03	8,62E-04	0,131	26,9	6	26,5
7.343	0,85	1,47E-03	8,37E-04	0,130	26,5	7	26,0
7.296	0,85	1,42E-03	8,12E-04	0,129	26,0	8	25,5
7.250	0,85	1,38E-03	7,88E-04	0,128	25,5	9	25,1
7.206	0,85	1,34E-03	7,64E-04	0,128	25,1	10	24,6
7.163	0,85	1,30E-03	7,41E-04	0,127	24,6	11	24,2
7.122	0,85	1,26E-03	7,19E-04	0,126	24,2	12	23,7
7.081	0,85	1,22E-03	6,97E-04	0,125	23,7	13	23,3
7.042	0,85	1,19E-03	6,76E-04	0,125	23,3	14	22,9
7.004	0,85	1,15E-03	6,56E-04	0,124	22,9	15	22,5
6.967	0,85	1,12E-03	6,36E-04	0,124	22,5	16	22,1
6.932	0,85	1,08E-03	6,17E-04	0,123	22,1	17	21,7
6.897	0,85	1,05E-03	5,98E-04	0,122	21,7	18	21,3
6.863	0,85	1,02E-03	5,80E-04	0,122	21,3	19	20,9
6.831	0,85	9,87E-04	5,62E-04	0,121	20,9	20	20,6
6.799	0,85	9,56E-04	5,45E-04	0,121	20,6	21	20,2
6.769	0,85	9,27E-04	5,29E-04	0,120	20,2	22	19,9
6.739	0,85	8,99E-04	5,12E-04	0,120	19,9	23	19,5
6.710	0,85	8,71E-04	4,97E-04	0,119	19,5	24	19,2
6.682	0,85	8,45E-04	4,81E-04	0,119	19,2	25	18,9
6.655	0,85	8,19E-04	4,67E-04	0,118	18,9	26	18,5
6.629	0,85	7,93E-04	4,52E-04	0,118	18,5	27	18,2
6.604	0,85	7,69E-04	4,38E-04	0,117	18,2	28	17,9
6.579	0,85	7,45E-04	4,25E-04	0,117	17,9	29	17,6
6.555	0,85	7,22E-04	4,12E-04	0,116	17,6	30	17,3
6.532	0,85	7,00E-04	3,99E-04	0,116	17,3	31	17,0
6.510	0,85	6,78E-04	3,86E-04	0,116	17,0	32	16,8
6.488	0,85	6,57E-04	3,74E-04	0,115	16,8	33	16,5
6.467	0,85	6,36E-04	3,63E-04	0,115	16,5	34	16,2
6.447	0,85	6,16E-04	3,51E-04	0,115	16,2	35	16,0
6.427	0,85	5,97E-04	3,40E-04	0,114	16,0	36	15,7
6.408	0,85	5,78E-04	3,30E-04	0,114	15,7	37	15,5
6.390	0,85	5,60E-04	3,19E-04	0,114	15,5	38	15,2
6.372	0,85	5,42E-04	3,09E-04	0,113	15,2	39	15,0

Número da Cascata	Temp. (C)	Densidade (kg/m ³)	Viscosidade Dinâmica (u)	Viscosidade (v)	Vazão de Ar (m ³ /h)	Velocidade (m/s)	Re	Diffusibilidade dos Gases (m ² /s)	Sc	Gr	Coef. de Trans. de Massa (m/s)	Concentração de Água nos Gases (kg/m ³)
40	151,5	0,82	2,40E-05	2,93E-05	35,741	4,9	843	9,42E-06	3,1	31,6	1,07E-01	4,77E-02
41	149,4	0,83	2,39E-05	2,91E-05	35,561	4,9	845	9,23E-06	3,1	31,2	1,05E-01	4,82E-02
42	147,4	0,83	2,39E-05	2,88E-05	35,384	4,9	848	9,04E-06	3,2	30,8	1,02E-01	4,86E-02
43	145,4	0,84	2,38E-05	2,86E-05	35,209	4,9	851	8,86E-06	3,2	30,4	9,96E-02	4,91E-02
44	143,4	0,84	2,37E-05	2,83E-05	35,037	4,8	854	8,68E-06	3,3	30,0	9,71E-02	4,95E-02
45	141,4	0,84	2,36E-05	2,81E-05	34,868	4,8	857	8,50E-06	3,3	29,6	9,47E-02	4,99E-02
46	139,5	0,85	2,35E-05	2,79E-05	34,702	4,8	859	8,33E-06	3,3	29,2	9,23E-02	5,03E-02
47	137,6	0,85	2,35E-05	2,77E-05	34,538	4,8	862	8,16E-06	3,4	28,7	8,99E-02	5,07E-02
48	135,7	0,86	2,34E-05	2,75E-05	34,377	4,7	865	7,99E-06	3,4	28,3	8,76E-02	5,11E-02
49	133,9	0,86	2,33E-05	2,72E-05	34,218	4,7	868	7,83E-06	3,5	27,8	8,53E-02	5,15E-02
50	132,1	0,86	2,32E-05	2,70E-05	34,062	4,7	871	7,67E-06	3,5	27,3	8,30E-02	5,19E-02
51	130,3	0,87	2,31E-05	2,68E-05	33,908	4,7	873	7,52E-06	3,6	26,9	8,08E-02	5,22E-02
52	128,5	0,87	2,31E-05	2,66E-05	33,757	4,7	876	7,36E-06	3,6	26,4	7,87E-02	5,26E-02
53	126,8	0,88	2,30E-05	2,64E-05	33,609	4,6	879	7,21E-06	3,7	25,8	7,66E-02	5,29E-02
54	125,0	0,88	2,29E-05	2,62E-05	33,462	4,6	882	7,07E-06	3,7	25,3	7,45E-02	5,32E-02
55	123,3	0,88	2,28E-05	2,60E-05	33,318	4,6	884	6,92E-06	3,8	24,8	7,24E-02	5,35E-02
56	121,7	0,89	2,28E-05	2,58E-05	33,177	4,6	887	6,78E-06	3,8	24,3	7,04E-02	5,39E-02
57	120,0	0,89	2,27E-05	2,56E-05	33,037	4,6	890	6,64E-06	3,9	23,7	6,85E-02	5,42E-02
58	118,4	0,89	2,26E-05	2,55E-05	32,900	4,5	893	6,51E-06	3,9	23,1	6,66E-02	5,44E-02
59	116,8	0,90	2,26E-05	2,53E-05	32,765	4,5	895	6,38E-06	4,0	22,6	6,47E-02	5,47E-02
60	115,2	0,90	2,25E-05	2,51E-05	32,632	4,5	898	6,25E-06	4,0	22,0	6,28E-02	5,50E-02
61	113,6	0,90	2,24E-05	2,49E-05	32,502	4,5	901	6,12E-06	4,1	21,4	6,10E-02	5,53E-02
62	112,1	0,91	2,24E-05	2,47E-05	32,373	4,5	904	6,00E-06	4,1	20,8	5,92E-02	5,55E-02
63	110,5	0,91	2,23E-05	2,46E-05	32,247	4,5	906	5,87E-06	4,2	20,2	5,75E-02	5,58E-02
64	109,0	0,92	2,22E-05	2,44E-05	32,123	4,4	909	5,75E-06	4,2	19,6	5,58E-02	5,60E-02
65	107,5	0,92	2,22E-05	2,42E-05	32,000	4,4	912	5,64E-06	4,3	18,9	5,42E-02	5,63E-02
66	106,1	0,92	2,21E-05	2,41E-05	31,880	4,4	915	5,52E-06	4,4	18,3	5,25E-02	5,65E-02
67	104,6	0,93	2,20E-05	2,39E-05	31,761	4,4	917	5,41E-06	4,4	17,6	5,09E-02	5,67E-02
68	103,2	0,93	2,20E-05	2,38E-05	31,645	4,4	920	5,30E-06	4,5	17,0	4,94E-02	5,69E-02
69	101,8	0,93	2,19E-05	2,36E-05	31,530	4,4	923	5,19E-06	4,5	16,3	4,79E-02	5,71E-02
70	100,4	0,94	2,19E-05	2,35E-05	31,418	4,3	925	5,09E-06	4,6	15,7	4,64E-02	5,73E-02
71	99,1	0,94	2,18E-05	2,33E-05	31,307	4,3	928	4,98E-06	4,7	15,0	4,49E-02	5,75E-02
72	97,7	0,94	2,17E-05	2,32E-05	31,198	4,3	931	4,88E-06	4,7	14,3	4,35E-02	5,77E-02
73	96,4	0,95	2,17E-05	2,30E-05	31,090	4,3	933	4,78E-06	4,8	13,6	4,22E-02	5,79E-02
74	95,1	0,95	2,16E-05	2,29E-05	30,984	4,3	936	4,68E-06	4,9	12,9	4,08E-02	5,81E-02
75	93,8	0,95	2,16E-05	2,27E-05	30,881	4,3	939	4,59E-06	5,0	12,2	3,95E-02	5,83E-02
76	92,5	0,96	2,15E-05	2,26E-05	30,778	4,3	941	4,50E-06	5,0	11,5	3,82E-02	5,84E-02
77	91,2	0,96	2,15E-05	2,24E-05	30,678	4,2	944	4,40E-06	5,1	10,8	3,70E-02	5,86E-02
78	90,0	0,96	2,14E-05	2,23E-05	30,579	4,2	947	4,32E-06	5,2	10,0	3,57E-02	5,87E-02
79	88,8	0,96	2,13E-05	2,22E-05	30,481	4,2	949	4,23E-06	5,2	9,3	3,45E-02	5,89E-02
80	87,6	0,97	2,13E-05	2,21E-05	30,385	4,2	952	4,14E-06	5,3	8,6	3,34E-02	5,90E-02

Vazão Mássica Umida(Argila)	Coef. de Resistência	Taxa de Evaporação	Massa de Água Evaporada	Massa da Partícula	Umidade Relativa do Material na Entrada da Cascata	Constante de Tempo	Umidade Relativa do Material na Saída da Cascata
(kg/h)		(g/s)	(g/part.)	(g)	(%)		(%)
6.354	0,85	5,25E-04	2,99E-04	0,113	15,0	40	14,8
6.337	0,85	5,09E-04	2,90E-04	0,113	14,8	41	14,6
6.321	0,85	4,92E-04	2,81E-04	0,112	14,6	42	14,4
6.305	0,85	4,77E-04	2,72E-04	0,112	14,4	43	14,2
6.290	0,85	4,61E-04	2,63E-04	0,112	14,2	44	14,0
6.275	0,85	4,47E-04	2,55E-04	0,112	14,0	45	13,8
6.261	0,85	4,32E-04	2,46E-04	0,111	13,8	46	13,6
6.247	0,85	4,18E-04	2,39E-04	0,111	13,6	47	13,4
6.234	0,85	4,05E-04	2,31E-04	0,111	13,4	48	13,2
6.221	0,85	3,92E-04	2,23E-04	0,111	13,2	49	13,0
6.208	0,85	3,79E-04	2,16E-04	0,110	13,0	50	12,9
6.196	0,85	3,67E-04	2,09E-04	0,110	12,9	51	12,7
6.185	0,85	3,55E-04	2,02E-04	0,110	12,7	52	12,5
6.173	0,85	3,43E-04	1,96E-04	0,110	12,5	53	12,4
6.162	0,85	3,32E-04	1,89E-04	0,110	12,4	54	12,2
6.152	0,85	3,21E-04	1,83E-04	0,109	12,2	55	12,1
6.141	0,85	3,11E-04	1,77E-04	0,109	12,1	56	11,9
6.131	0,85	3,00E-04	1,71E-04	0,109	11,9	57	11,8
6.122	0,85	2,90E-04	1,66E-04	0,109	11,8	58	11,7
6.113	0,85	2,81E-04	1,60E-04	0,109	11,7	59	11,5
6.104	0,85	2,71E-04	1,55E-04	0,109	11,5	60	11,4
6.095	0,85	2,62E-04	1,49E-04	0,108	11,4	61	11,3
6.086	0,85	2,53E-04	1,44E-04	0,108	11,3	62	11,2
6.078	0,85	2,45E-04	1,40E-04	0,108	11,2	63	11,0
6.071	0,85	2,37E-04	1,35E-04	0,108	11,0	64	10,9
6.063	0,85	2,29E-04	1,30E-04	0,108	10,9	65	10,8
6.056	0,85	2,21E-04	1,26E-04	0,108	10,8	66	10,7
6.049	0,85	2,13E-04	1,22E-04	0,108	10,7	67	10,6
6.042	0,85	2,06E-04	1,17E-04	0,108	10,6	68	10,5
6.035	0,85	1,99E-04	1,13E-04	0,107	10,5	69	10,4
6.029	0,85	1,92E-04	1,09E-04	0,107	10,4	70	10,3
6.023	0,85	1,85E-04	1,06E-04	0,107	10,3	71	10,3
6.017	0,85	1,79E-04	1,02E-04	0,107	10,3	72	10,2
6.011	0,85	1,72E-04	9,83E-05	0,107	10,2	73	10,1
6.005	0,85	1,66E-04	9,48E-05	0,107	10,1	74	10,0
6.000	0,85	1,60E-04	9,15E-05	0,107	10,0	75	9,9
5.995	0,85	1,55E-04	8,82E-05	0,107	9,9	76	9,9
5.990	0,85	1,49E-04	8,51E-05	0,107	9,9	77	9,8
5.985	0,85	1,44E-04	8,20E-05	0,107	9,8	78	9,7
5.981	0,85	1,39E-04	7,91E-05	0,106	9,7	79	9,6
5.976	0,85	1,34E-04	7,62E-05	0,106	9,6	80	9,6

ANEXO III - METODOLOGIAS DE TESTE DE PROPRIEDADES DAS ARGILAS

A. Método de Determinação do Teor de Umidade de Recebimento de Bentonita (GB-LQ-CQ-07)

Objetivo:

Esta norma prescreve o método de determinação do teor de umidade de recebimento de bentonita para uso na BUN.

Aparelhagem:

Na aplicação deste método deve ser utilizada a seguinte aparelhagem:

- a. Balança de precisão de 0.01g;
- b. Pesa-filtro com tampa;
- c. Espátula;
- d. Estufa de laboratório, com capacidade de atingir a temperatura de 300°C;
- e. Dessecador.

Execução do Ensaio:

Na execução do ensaio deve ser cumprido o seguinte procedimento:

- a. Pesar 10g da amostra de bentonita e colocar no pesa-filtro, com a tampa, previamente tarado;
- b. Secar em uma estufa, à temperatura de 105 a 130°C, deixar a tampa do pesa-filtro no bocal em ângulo de 45°, até que a massa permaneça constante (aproximadamente 3 a 4 horas);
- c. Retirar a amostra da estufa, fechar o pesa-filtro e deixá-lo esfriar em um dessecador até a temperatura ambiente;
- d. Determinar a massa do resíduo.

Resultado:

O teor de umidade da amostra deve ser calculado de acordo com a seguinte equação:

$$U = \frac{M_a - M_r}{M_a} \cdot 100$$

onde: U é o teor de umidade de recebimento, em %.

M_a é a massa da amostra utilizada, em g.

M_r é a massa do resíduo após a secagem em estufa, em g.

B. Método de Determinação do Poder de Inchamento de Bentonita (GB-LQ-CQ-08)

Objetivo:

Esta norma prescreve o método de determinação do poder de inchamento de bentonita para uso na BUN.

Aparelhagem / Reagente:

- Balança com uma precisão de 0.01g;
- Vidro de relógio;
- Espátula;
- Proveta graduada de 100 ml;
- Pincel;
- Água destilada.

Metodologia:

Na execução do ensaio deve ser cumprido o seguinte procedimento na ordem:

- Pesar uma quantidade de bentonita no estado original de fornecimento, equivalente a 2.0g de bentonita seca. A massa de bentonita no estado original de recebimento, deve ser calculada de acordo com a seguinte equação:

$$M = \frac{200}{100 - U}$$

onde: M = massa de bentonita no estado original de recebimento, em gramas;

U = teor de umidade de recebimento, em %, calculado conforme a GB-LQ-CQ-

07.

b. Colocar 100 ml de água destilada em uma proveta graduada;

c. Adicionar pequenas porções de no máximo 0.1 g de amostra, deixando-a decantar antes de efetuar uma nova adição. O tempo normal de adição é de aproximadamente 2 horas, que pode variar, dependendo do tipo de bentonita. Trepidação da proveta e aderência da bentonita nas paredes devem ser evitados;

d. Deixar em repouso durante 24 horas.

Resultado:

O valor do inchamento é obtido através da leitura feita na graduação da proveta, expresso em milímetros, com exatidão de 1.0 ml, após 24 horas o término da adição da bentonita. Após 2 horas do término desta adição, é possível ter-se uma previsão aproximada do inchamento final da bentonita.

C. Método de Determinação da Granulometria # + 200 Mesh em Bentonita (GB-LQ-CQ-09)

Objetivo:

Esta norma prescreve o método de determinação da granulometria # + 200 Mesh em bentonita para uso da BUN.

Aparelhagem:

Na aplicação deste método é utilizada a seguinte aparelhagem:

- Balança com uma precisão de 0.01g;
- Cápsula de porcelana;
- Estufa de laboratório, com capacidade de atingir a temperatura de 300°C;
- Dessecador;

- e. Espátula;
- f. Peneira ABNT 200 (abertura de malha de 0.075 mm), acompanhada de fundo e tampa;
- g. Peneirador mecânico;
- h. Pincel;
- i. Folha de papel liso e de cor clara.

Execução do Ensaio

Na execução do ensaio deve ser cumprido o seguinte procedimento, na ordem:

- a. Pesar aproximadamente 100g da amostra;
- b. Secar em uma estufa a amostra a uma temperatura de 105 a 130°C, até que a massa permaneça constante;
- c. Retira a amostra da estufa e deixá-la esfriar em um dessecador até a temperatura ambiente;
- d. Pesar 50g da amostra seca e colocar na peneira;
- e. Peneira no peneirador mecânico, durante 15 min;
- f. Determinar a massa de material retido na peneira.

Resultados:

O percentual de partículas # + 200 Mesh é expresso com precisão de uma casa decimal e é dado pela seguinte equação:

$$B = 2A$$

Onde: B = Material retido na peneira, em %;

A. = Material retido na peneira, em g.

D. Método de Determinação da Adsorção de Azul de Metileno em Bentonita (GB-LQ-CQ-10)

Objetivo:

Esta norma prescreve o método de determinação da adsorção de azul de metileno em bentonita, para uso da BUN.

Definição:

Adsorção de azul de metileno é a quantidade máxima de azul de metileno adsorvida por amostra de bentonita.

Aparelhagem:

Na aplicação deste método é utilizada a seguinte aparelhagem:

- a. Balança analítica;
- b. Copo de aço inoxidável com capacidade para 250 ml. Caso use fervura como método de dispersão, utilizar um frasco erlenmeyer com capacidade para 250 ml;
- c. Vibrador ultrasônico. Caso use "fervura", como método de dispersão, empregar chapa de aquecimento;
- d. Bureta graduada com capacidade para 50 ml;
- e. Bastão de vidro;
- f. Papel de filtro de faixa azul.

Reagentes:

Na aplicação deste método devem ser usados os seguintes reagentes:

- a. solução aquosa de pirofosfato de sódio a 3%;
- b. solução aquosa centimolar de azul de metileno;
- c. Água destilada.

Ensaio:

Na execução do ensaio deve ser cumprido o seguinte procedimento, na ordem:

- a. Pesar uma amostra de bentonita no estado de recebimento, a fim de se obter 0.5g na base seca, calculada de acordo com a seguinte equação:

$$M = \frac{50}{100 - U}$$

Onde: M = massa de bentonita no estado original de recebimento, em g;

U = teor de umidade de recebimento em %, conforme GB-LQ-CQ-07

- b. Transferir a amostra para o copo de aço inoxidável;
- c. Pesar 5.0g de areia de sílica isenta de argila e adicioná-la à amostra;
- d. Adicionar 50 ml da solução de pirofosfato de sódio e levar o conjunto vibrador ultrasônico, deixando vibrar durante 7 min. Caso use "fervura como método de dispersão, adicionar à amostra 80 a 100 ml de água destilada, deixando em fervura branda durante 2 min. Resfriar e adicionar 20 ml de solução de pirofosfato de sódio;
- e. Posicionar o copo sob a bureta e adicionar 80 a 90% da quantidade de solução de azul de metileno prevista para a saturação;
- f. Agitar mecanicamente, durante 2 min. Pode-se utilizar agitação manual vigorosa;
- g. Colocar uma gota da solução de azul de metileno do copo de aço inoxidável sobre o papel de filtro, com o auxílio do bastão de vidro;
- h. Aguardar cerca de 30s e verificar se houve ou não formação de um halo azul esverdeado ao redor da mancha existente no papel de filtro. Em caso afirmativo desprezar o ensaio e iniciar outro com uma quantidade inicial menor de solução de azul de metileno. Em caso negativo, continuar o ensaio;
- i. Colocar mais 1 ml da solução de azul de metileno no copo de aço inoxidável;
- j. Agitar mecânica ou manualmente durante 2 min e colocar nova gota de solução no papel de filtro, observando se houve ou não formação de halo;
- k. Repetir a operação j, até o aparecimento do halo (procurar obter o ponto final, isto é, o aparecimento do halo com 4 ou 5 gotas no máximo, por papel de filtro, dispondo-os sequencialmente na periferia do mesmo);
- l. Agitar a solução mecanicamente durante 2 min ou manualmente durante 5 min, após o aparecimento do halo;

m. Repetir as operações de l a l, caso o halo tenha desaparecido, até que a segunda agitação para a mesma quantidade de azul de metileno não faça desaparecer o halo azul esverdeado;

n. Anotar o volume total gasto da solução de azul de metileno.

Resultados:

O resultado é expresso em milímetros com exatidão de 1 ml e corresponde ao volume fatorado da solução de azul de metileno gasto na saturação de 0.5g de bentonita na base seca.

E. Ensaio de Argila Ativada para Fluido Doce de Perfuração à Base de Água Doce (Petrobrás)

Objetivo:

Esta norma fixa o método pelo qual devem ser verificados os requisitos a que deve obedecer a argila ativada para fluidos de perfuração à base de água doce, objeto da norma N-1398.

Aparelhagem:

- a. Balança com sensibilidade de 0.01 g, no mínimo.
- b. Misturador Hamilton-Beach, modelo 936, com respectivo copo ou similar. A velocidade no eixo do misturador deve se situar na faixa de 16000 a 20000 rpm no ar. O eixo do misturador deve ser provido de duas palhetas corrugadas, sendo a superior de diâmetro igual a (2.85 ± 0.05) cm com a inferior de diâmetro igual a (2.50 ± 0.05) cm. A distância entre elas deve ser de (2.70 ± 0.10) cm.
- c. Regulador de voltagem para manter a tensão no misturador dentro de 5% do valor nominal.
- d. Viscosímetro Fann V-G Meter, modelo 35-A, devidamente calibrado.
- e. Filtro-prensa para teste de filtração API.
- f. Papel de filtro Whatman nº50 ou equivalente.
- g. Proveta de 25 ml, graduada em 0.2 ml.

h. Estufa que forneça temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$.

i. Peneira ABNT de abertura 0.075 mm, com diâmetro de 7.62 cm e distância do topo à tela de 6.35 cm

j. Aparelho medidor de pH, com aproximação de um décimo de unidade.

Reagente:

Tetrafosfato ou metafosfato de sódio

Procedimento:

a. Preparação da Suspensão:

a.1. Preparar uma suspensão contendo 24.3 g de argila Tipo I ou 32.0 g de argila Tipo II em 500 ml de água destilada.

a.2. Manter o misturador na velocidade mais baixa durante a adição de argila à água

a.3. Agitar a amostra, em velocidade dentro da faixa especificada no item b da aparelhagem, durante 20 min.

a.4. Interromper a agitação, uma única vez, após 2 min do seu início, durante no máximo trinta segundos, para raspar qualquer quantidade de argila que possa ter aderido à parede do recipiente.

a.5. Deixar em repouso, por 24 horas, em recipiente fechado, à temperatura ambiente.

b. Viscosidade Aparente e Viscosidade Plástica

b.1. Agitar a suspensão preparada no item 5.1, durante 5 min, em velocidade dentro da faixa especificada no item b da aparelhagem.

b.2. Transferi-la para o recipiente do viscosímetro e acioná-lo a 600 rpm, durante 2 min. Efetuar a leitura.

b.3. Mudar imediatamente para 300 rpm, fazendo a leitura após 15 segundos.

b.4. Anotar a viscosidade aparente, em cP, como o valor obtido a 600 rpm, dividido por 2.

b.5. Anotar a viscosidade plástica, em cP, como a diferença das leituras procedidas a 600 e a 300 rpm.

c. Filtrado API

c.1. Após a determinação das leituras a 600 e 300 rpm, retornar a suspensão ao copo do misturador e reagitá-la durante 1 min, em velocidade dentro da faixa especificada no item b da aparelhagem.

c.2. Transferir para um recipiente de filtro-prensa contendo papel de filtro Whatman nº50, ou equivalente, que deve ser utilizado uma única vez.

c.3. Aplicar a pressão, de modo que esta atinja (690 ± 35) kPa em menos de 30 segundos.

c.4. Evaporar em banho-maria e secar o resíduo em estufa a (105 ± 5) °C por uma hora.

c.5. Esfriar, em seguida, em dessecador e tomar a sua massa com aproximação de 0.01g.

c.6. A percentagem de resíduo retido na peneira é expressa pela fórmula:

$$\text{Resíduo(\%)} = \frac{\text{Massa do Resíduo}}{\text{Massa da Amostra}} \cdot 100$$