

2171791

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
PROJETO MECÂNICO

ANÁLISE DA SECAGEM DE MICA

ALUNO: CLAUDIO MÜLLER  
ORIENTADOR: PROF.DR.  
JOSÉ M.SAIZ JABARDO

1982

## A G R A D E C I M E N T O S

Gostaria de expressar aqui os meus sinceros -  
agradecimentos ao meu amigo, colaborador e orientador -  
Prof. Dr. José Maria Saiz Jabardo que possibilitou a exe-  
cção desse trabalho.

O autor.

## I N D I C E

Pág.

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. MICAS, NATURAL E SINTÉTICA .....	2
2.1- Introdução .....	2
2.2- Micas Naturais .....	5
2.3- Mineração, Preparação e Processamento.....	7
2.4- Cor, Manchas e Minerais Secundários Associados	9
2.5- Graus, Qualidade e Especificações das lâminas de Mica .....	11
2.6- Sucata de Mica e Mica Triturada.....	14
2.7- Micas Sintéticas de Fluor .....	16
2.8- Propriedades.....	17
2.9- Relação entre fases .....	18
2.10-Recipientes e Cadinhos .....	19
2.11-Fundição com resistências internas.....	19
2.12-Fundição com resistência em arco.....	22
2.13-Reação por estado sólido.....	23
2.14-Tamanho e Qualidade do produto.....	24
2.15-Moagem.....	25
2.16-Produtos Especiais .....	25
2.16.1-Mica Composta.....	25
2.16.2-Glass Bonded Mica.....	26
2.16.3-Mica com fosfato.....	27
2.16.4-Folha ou papel de mica recuperada.....	27
2.17-Substitutos da Mica .....	29
2.18-Saúde e fatores de segurança.....	29
2.19-O uso da Mica.....	30
2.19.1-Lâminas de Mica. Blocos e películas....	30
2.19.2-Escamas e Micas compostas.....	31
2.19.3-Sucata, Flocos e Mica Triturada.....	32
2.19.4-Glass Bonded Mica.....	33
2.19.5-Lâminas ou papel de mica recuperada....	33



## 1. INTRODUÇÃO

Esse trabalho visa desenvolver um modelo teórico de - como se processa a secagem de um elemento úmido, no nosso caso a mica, aproximando-o posteriormente para um caso real.

O trabalho consta em sua parte inicial de uma pesquisa sobre a mica, o que é, para que serve, quais são os tipos, - aonde é encontrada, etc. Essa pesquisa se fez necessária, a medida que nenhuma literatura sobre o assunto (a nossa biblioteca não possuia), sendo que a mesma será uma contribuição de valor por esse motivo.

Essa pesquisa foi feita em vários lugares tais como: Instituto de Química, Escola Politécnica (Minas, Metalúrgica, - Química) e Rhodia S/A. (Divisão Química), sendo que, se maiores informações se fizerem necessária, basta procurar as bibliotecas dos respectivos lugares citados.

O nosso trabalho teve origem em um fato real, no qual uma firma, que explorava a mica em Governador Valadares, - procurava reduzir seus gastos substituindo o óleo BPF da caldeira por mica, sendo que, para que a queima tivesse um rendimento satisfatório a mica deveria estar com baixa umidade (em torno de 5% b.u.) uma vez que a mesma era encontrada bem úmida (em torno de 50% b.u.), por esse motivo, o estudo da secagem do mesmo se fez necessária.

Pelo fato de se necessitar de uma produção contínua - de material para a queima e pelas características do material, o "Perry" sugere que o secador seja do tipo direto rotativo.

## 2. MICAS, NATURAL E SINTÉTICA

### 2.1 - Introdução

Mica é o nome dado para um grupo de minerais de silicato hidratado de alumínio, constituída de lâminas extremamente finas, e caracterizada por uma quase perfeita divisão e um alto grau de flexibilidade, elasticidade e dureza.

Lâminas muito finas, de cerca de 15  $\mu\text{m}$  de espessura, podem ser obtidas e utilizadas facilmente.

As várias micas, apesar de semelhantes estruturalmente, podem variar bastante na composição química, em particular os tipos raros, entretanto, dentro de qualquer variedade, a composição não varia muito.

As propriedades da mica provêm da existência em série de ligações químicas fortes alternada com ligações fracas.

Cada simples folha de mica possui uma fraca camada de ligação (Potássio) e três fortes camadas de ligação (duas de sílica e uma de alumínio ou magnésio).

Os minerais do grupo da mica são mostrados na tabela 1. Geralmente, a relação Si : Al é cerca de 3:1.

A fórmula geral dá o número de ions na unidade básica, e é a repetição da unidade da mica inorgânica.

A fórmula mostrada para phlogopite na tabela 1 é este quiométrica. Porque forma uma série contínua com o biotite (o limite entre ambos é arbitrário), o phlogopite contém algum ferro substituído por magnésio. A phlogopite natural contém ambos os ions de OH e F. Um phlogopite natural todo de fluor parece não existir, entretanto, micas de fluor sintética, de alta pureza podem ser fabricadas.

Tabela 1 - Mica: Grupos Minerais

<u>Mineral</u>	<u>Fórmula</u>
<b>- Espécies principais</b>	
Muscovite	$K_2Al_4(Al_2Si_6O_{20})(OH)_4$
Phlogopite	$K_2Mg_6(Al_2Si_6O_{20})(OH,F)_4$
Biotite	$K_2(Mg,Fe)_6(Al_2Si_6O_{20})(OH)_4$
Lepidolite	$K_2Li_3Al_3(Al_2Si_6O_{20})(OH,F)_4$
<b>- Outros</b>	
Roscoelite	$K_2V_4(Al_2Si_6O_{20})(OH)_4$
Fuchsite	$K_2Cr_4(Al_2Si_6O_{20})(OH)_4$
Fluorophlogopite	$K_2Mg_6(Al_2Si_6O_{20})F_4$
Paragonite	$Na_2Al_4(Al_2Si_6O_{20})(OH)_4$

Vermiculite, um produto da alteração hidrotérmica de phlogopite e biotite, não deve ser classificada como mica.

Algumas micas são fontes de raros elementos, com por exemplo o lepidolite para o lítio e o roscoelite para o vanádio.

Todas as micas se cristalizam em lâminas, como cristais monoclinicos de seis lados. A característica é a quase-perfeita divisão básica, as quais permitem os cristais ou folhas serem divididas em pequenas lâminas.

A espessura final da lâmina depende quase que exclusivamente de considerações mecânicas. A resistência mecânica e a elasticidade são características de variedade comercial.

As propriedades da muscovite, phlogopite, fluorophlogopite são mostrados na tabela 2.

Muscovite e phlogopite são as duas micas naturais e a fluorophlogopite é a mica sintética mais usada na indústria elétrica.

Tabela 2 - Propriedades da Mica natural e sintética.

<u>Propriedade</u>	<u>Natural</u>		<u>Sintética</u>
	Muscovite	Phlogopite	Fluorophlogopite
-densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,6 a 3,2	2,6 a 3,2	2,8
- dureza, Mohs	2,0 a 3,2	2,5 a 3,0	3,4
-Orientação do plano ótico com o plano de simetria.	perpendicular	paralelo	paralelo
-Índice de re- fração, n <sub>D</sub>			
α	1,552 a 1,570	1,54 a 1,63	1,522
ε	1,582 a 1,607	1,57 a 1,69	1,549
γ	1,588 a 1,611	1,57 a 1,69	1,549
-Máxima tempe- ratura permis- ível, °C.	400 a 500	850 a 1000	1200
-Calor especí- fico a 25 °C. J/g	0,049	0,049	0,046
-Módulo de elasticidade (MPa)	1,723 x 10 <sup>5</sup>	1,723 x 10 <sup>5</sup>	-
-% de água	5,0	3,2	0
-Ponto de fu- são °C	-	-	1387 ± 3
-Constante dielétrica	6,5 a 9	5 a 6	6,5
-Fator de po- tência a 25°C(%)			
- a 60 HZ	0,08 a 0,09		
a 1 MHz	0,01 a 0,02	0,3	0,02
-Resistência Ω x cm	10 <sup>12</sup> a 10 <sup>15</sup>	10 <sup>10</sup> a 10 <sup>13</sup>	10 <sup>12</sup> a 10 <sup>15</sup>

A conveniência do filme de mica para uso em condensadores depende do fator de potência. Desde que o superaquecimento e os danos são provenientes das perdas de alta potência, uma boa mica condensadora deve ter um fator de dissipação menor que 0,04% a 1 MHz. O "Q", valor que é recíproco do fator de dissipação, comumente é usado como teste. Para bons condensadores deve ser de pelo menos 2500 (correspondendo a um fator de potência de 0,04%).

A mica muscovite não é afetada por substâncias químicas usualmente encontradas em isolamentos elétricos. O óleo não ataca a superfície entretanto, quando combinado com água ou outros líquidos, pode entrar entre as lâminas por ação capilar. Embora resistente a combustão de gases, a muscovite é atacada pelo ácido hidrofluórico, fundida pelo hidróxido alcalina, aquecida pelo carbonato alcalino e água contendo dióxido de carbono. A muscovite não reage ao ácido sulfúrico ou hidroclórico, entretanto algumas reações acontecem com o ácido fosfórico.

A fluorophlogopite e a phlogopite são atacadas igualmente, porém a última é decomposta pelo ácido sulfúrico.

Todas as micas naturais, quando aquecidas a uma determinada temperatura, perdem água mas a muscovite pode ser usada para fins elétricos até a temperatura aproximada de 500°C e a phlogopite até 750 a 1000 °C, dependendo da fonte de aplicação. As micas de fluor sintética não tem água na sua estrutura e podem ser usadas até cerca de 1200 °C.

## 2.2 - Micas Naturais

A mica é largamente encontrada em pequenos flocos em muitas rochas ígneas, metamórficas e sedimentares. Alguns depósitos de xisto contém muscovite suficiente para ser recuperado e usada como sucata de mica.

As lâminas de muscovite são obtidas de uma granulação

grossa de uma rocha ígnea chamada pegmatite. Pegmatites bem divididas são a melhor fonte para lâminas de mscovite comercial. Geralmente, as divisões ou zonas são sucessivas capas, completas ou incompletas, que muitas vezes refletem a forma ou a estrutura de todo um corpo de pegmatite. No melhor desenvolvimento, as zonas estão concentradas em torno de uma zona interna - referida como núcleo. A nomenclatura para as zonas a partir da mais exterior é a seguinte: zona limite, zona parede, zonas intermediárias e núcleo. A melhor qualidade e a maior concentração de lâminas muscovite, usualmente é encontrada na zona parede. Concentrações menos importantes ocorrem nas zonas intermedíarias e no núcleo. Quando a Pegmatite é mal zoneada, a muscovite é espalhada através da rocha.

Depósitos de phlogopite são encontrados em áreas de rochas sedimentares metamorfoseadas, penetradas por massas de pegmatite, ricas em granito. A phlogopite é encontrada como veias ou bolsas de pyroxenite intercalada ou interseccionada com mármore ou gnaisse.

Através do mundo, a ocorrência de alta qualidade em larga escala de tamanhos de lâminas de mica é irregular e rara. Mesmo na famosa área de mica em Bihar, na India, dentre uma centena de veias, apenas duas ou três são bastante ricas para permitir seu desenvolvimento numa escala extensiva. Grandes porções de blocos de mica comercialmente extraídas da rocha constituem 2 a 6% do mesmo. Bolsas de mica podem representar até 40% de algumas partes das pegmatites, mas em grandes corpos de pegmatite, a mica raramente chega a mais de 2% da rocha hospitaleira.

A qualidade muda muito de lugar para lugar na mesma pegmatite. Esta diversidade de qualidade e quantidade torna muito difícil delinear e qualificar as atuais reservas e recursos.

A principal fonte de sucata (flocos) de mica dos Estados Unidos para fins urgentes são as desgastadas minas de alaskite e pegmatites na Nova Carolina. A mica é recuperada como um coproducto ou subproduto derivado do feldspar, caulim e lí-

tio. Flocos de mica também são recuperados de xistos de muscovite. Estes flocos de xisto podem variar em tamanho de três a várias centenas de metros de espessura e muitos kilometros de comprimento. O conteúdo de mica varia mas pode alcançar até 90%.

### 2.3 - Mineração, Preparação e Processamento

A singular propriedade da mica e sua variada característica na sua ocorrência natural é tal, que os métodos empregados na mineração e processamento de outros tipos de minerais são aplicados somente a uma limitada extensão no desenvolvimento de depósitos de mica.

Os métodos de mineração para as minas de lâminas de mica, tendem a ser um tanto primitivos em operações subterrâneas de pequena escala. Poços de minas abertos são usados quando possível. Deve se tomar cuidado no sentido de evitar perfurações em bons cristais de mica. Um explosivo de baixa velocidade pode ser necessário para explodir um bolsa de mica. Vários buracos são feitos de uma só vez para evitar a destruição dos blocos de mica.

A natureza, extensão e qualidade de muitos minérios e minerais podem ser previstas pela evidência geológica, mas as lâminas de micas podem ser distribuídas tão desigualmente em pegmatites, que é virtualmente impossível estimar, seja sua quantidade ou qualidade presente. Muitos minerais metálicos e não metálicos podem ser beneficiados ou mesmo reduzidos ou quimicamente tratadas para produzir produtos altamente purificados comercialmente. O valor das lâminas de mica, entretanto, depende do tamanho, estrutura e pureza das folhas que podem ser obtidas pela divisão e corte dos blocos naturais de mica. Nenhuma destas importantes características das lâminas de mica podem ser melhoradas nem pelo processo metalúrgico, nem pelo químico.

A preparação das folhas de mica requer tempo e custo de trabalho manual. Os blocos brutos de mica são extraídos da rocha a mão e trabalhadas para remover toda sujeira aderente, rocha e mica imperfeita. A mica é então grosseiramente dividida (feito lâminas) em espessuras apropriadas e os principais defeitos são removidos. A mica produzida desta forma é largamente classificada como não preparada ou sucata de mica. É então aparada com uma faca e chanfreada, removendo-se bordas quebradas, beiradas desfeitas escamas soltas e outras imperfeições. Cuidados são tomados para se obter uma lâmina final de máxima área útil com um mínimo de desperdício.

Na Índia, a maioria da mica é totalmente aparada, isto é, todas as imperfeições nas bordas são eliminadas. As bordas são chanfradas a fim de facilitar a subsequente divisão em finas folhas ou filmes. Outros tipos de aparar são também conhecidos na indústria. Amassar aparando, método usual de preparação da mica, limita-se a quebrar as beiradas esfareladas, a mão. A mica meio aparada é aparada em duas beiradas adjacentes, e em três quartos as imperfeições são cortadas dos lados. Depois de aparada, a mica é classificada de acordo com o tamanho e qualidade. É vendida tanto como bloco de mica ou dividida ainda em películas ou lascas.

A película é retirada de blocos de mica ou outras lâminas que são muito finas para serem classificadas como blocos. A produção de películas de mica requer um trabalho manual especial. O trabalhador deve ser capaz de dividir a mica em uma estreita gama de espessura.

As lascas são processadas num bloco de baixa qualidade e as lâminas são tão finas que são insatisfatórias para a obtenção de películas. Novamente o trabalho manual especializado é requerido para dividir a mica nas espessuras requeridas. As divisões são feitas de três formas: (1) - Divisão de bloco - são divisões em lâminas, com a espessura desejada, do mesmo bloco de mica que a seguir é polvilhado com pó de mica e depois reagrupada na mesma forma que o bloco original.

(2) Em camadas - as divisões são reunidas e colocadas em camadas iguais onde cada camada é separada por uma fina folha de papel e prensada todas juntas. As pilhas de mica são então juntadas, empacotadas e embarcadas.

(3) Os pedaços não empacotados devido às perdas são - os mais baratos e fáceis de serem processados. Os pedaços são separados pelos diferentes tamanhos e então empacotados em caixa para embarque, às vezes ,as porções são pulverizadas com pó de mica para impedi-las de aderirem umas as outras.

A sucata de mica obtida da mineração, corte ou fabricação de folhas de mica é empacotada e vendida para trituradores sem qualquer outro processamento. Nos EUA a sucata de mica é minerada em larga escala por método de extração.

Os flocos de mica, os quais são recuperados dos pegmatites, xistos ou outras rochas, são obtidos triturando ou quebrando a rocha hospitaleira e beneficiando por flutuação. Depois de passar através de um recipiente para drenagem,e algumas vezes num secador rotativo, a mica é moída.

#### 2.4 - Cor, Manchas e Minerais Secundários Associados

A muscovite é muitas vezes chamada de mica branca ou vermelha, para se distinguir da phlogopite, a qual é muito frequentemente chamada de mica ambar. Em cristais ou grossas folhas, as cores de muscovite alinharam-se através dos vários tons de vermelho e verde dependendo da quantidade de ferro e de outros ions. De fato, a cor é a base para a classificação industrial da muscovita em rubi (rosado, marrom claro) e não rubi - (marrom, amarelo esverdeado, verde amarelado e verde). Quando dividida em finas películas, ambas, a muscovite e phlogopite, são quase sem cor e transparente, embora quando vistas contra um fundo bem branco, a variedade verde pode ser reparada. Manchas, minerais visíveis ou inclusões vegetais geralmente redu-

zem o valor industrial da mica.

Inclusões de outros minerais nos blocos de mica são algumas vezes referidas como manchas. Alguns minerais como a magnetite,  $Fe_3O_4$ , e hematite,  $Fe_2O_3$ , são paralelos com a base, nos outros como o quartzo,  $SiO_2$ , e zircon,  $ZrSiO_4$ , penetram o plano da base e produzem os buracos de pino.

As manchas são classificadas como primárias ou secundárias. As primárias são formadas durante a cristalização e incluem manchas coloridas, uma espécie de mancha referida como vegetal embora seja inorgânica e inclusões minerais. Manchas secundárias são formadas entre os planos de rachadura, principalmente pela ação de água que círcula, incluindo a corrente de ar. Manchas primárias de ar consistem de gases presos entre as rachaduras, fendas em forma de bolsas achatadas, pequenas bolhas ou grupo de bolhas lá deixadas quando de sua origem. A penetração do ar é causada pela má manipulação da mica durante sua preparação, particularmente quando aparada por uma faca cega ou tesoura.

As manchas primárias não são relacionadas em profundidade; são mais prováveis de aumentar conforme a profundidade aumenta. As manchas secundárias ocorrem somente na ou perto da superfície e são ausentes das partes de depósitos que estão além da zona oxidata.

Manchas minerais são as mais sérias impurezas; elas incluem inclusões de cristais reconhecidos ou grupo de cristais. Magnetite e hematite são as mais comuns inclusões minerais, porém mais de trinta outros minerais tem sido identificados dentro dos blocos de muscovite. Embora as inclusões de magnetite possam prejudicar seriamente as qualidades da divisão da muscovite, as inclusões de hematite parecem ter pouca influência na preparação comercial. Ambas, hematite e magnetite, entretanto, quando ocorrem, aumentam seriamente a condutância da mica e assim diminuem seu valor.

### 2.5 - Graus, Qualidades e Especificações das lâminas de Mica

As lâminas de mica são classificadas de acordo com: a preparação, incluindo ai se foi misturada a mão ou não, se foi aparada a mão, meio aparada, três quartos aparada ou totalmente aparada; grossura, isto é, blocos, películas e lascas; tamanhos (ver tabela 3); aparência (somente para muscovite) incluindo côn, nivelamento, manchas, rachaduras, inclusões de ar, ondulação, padrão ou forma, jatos de areia e outros; qualidade elétrica (ver tabela 4); estabilidade térmica (para phlogopite) (alto aquecimento da phlogopite deve resistir 750°C por 30 minutos com menos de 25% de aumento em espessura, depois do resfriamento não deve apresentar nenhuma transformação evidente, como manchas prateadas, etc).

As classificações seguintes referem-se à espessura:

O bloco de mica possui uma espessura de no mínimo - 0,18 mm com uma área mínima utilizável de 6,5 cm<sup>2</sup>.

A película de mica é uma fina lâmina ou lâminas cortadas de um bloco de melhor qualidade. A especificação da espessura diz que a mesma pode variar de 0,032 a 0,10 mm com uma tolerância de 0,0062 mm. As películas usualmente cortadas de blocos de boa qualidade de mica manchadas, não devem ser confundidas com os finos resíduos do processamento da mica, conhecida como escamas, restos de limpeza, etc.

Escamas são pedaços finos e irregulares de mica com um máximo de 0,03mm de espessura. A espessura desejável é de - 0,018 a 0,025 mm. As escamas usualmente são, embora não necessariamente, feitas de uma qualidade inferior e de tamanhos menores de mica, ambos de muscovite e phlogopite.

Em adição a estas categorias, a classificação do termo fina refere-se a mica aparada a faca de espessura de - 0,05 a 0,018 mm.

A muscovite rubi claro é a mica natural de mais alta qualidade e de maior confiança no que se refere ao desempenho. As micas verdes e escuras são as mais variáveis, particularmente no que se refere ao fator dessipaçāo, mas pode ser igualmente valiosa uma vez que passe pelos testes de laboratório de propriedades elétricas. Ferro, ambos, ferríco e ferroso, pode ser substituído por Mg ou Al, e é o principal constituinte que eleva as qualidades elétricas inferiores. Num rápido mas destrutivo teste para ferro, a amostra é aquecida numa atmosfera oxídada num forno a  $800^{\circ}\text{C}$  -  $1000^{\circ}\text{C}$  por 5 ou 10 minutos. Uma cor prateada indica uma baixa concentração de ferro, enquanto bronzeado a marrom indica uma alta concentração.

Graduar a mica em tamanho e qualidade é uma custosa operação manual requerendo habilidade e experiência. Em geral, os padrões mundiais são baseados em escalas estabelecidas na India, o principal produtor e exportador de lâminas de mica, entretanto, os padrões não são observados com o mesmo grau de precisão em outros lugares.

O bloco de mica muscovite é classificado pela ASTM, baseado no sistema de Bengala, India, em 13 grupos de qualidade, de acordo com a cōr, aparência, bem como, manchas, ondas, rachaduras, inclusões, etc. A melhor é V-1, clara, a qual é dura, lisa ou quase lisa, cōr uniforme livre de todas manchas, inclusões, rachaduras e outros defeitos similares. A mais pobre e inferior é a V-12, que é densamente escura e manchada de vermelho, a qual entretanto é utilizável para algumas aplicações que possam conter todos os defeitos comuns.

Um teste com um circuito de ressonância, conhecido como "Q-metro", testa a mica e outros isolamentos. Os resultados dos testes são em unidades de Q e para a melhor mica deve ser em torno de 2500. Desde que Q na realidade é o recíproco do fator de potência ou dissipação ( $Q = 1$  fator de potência), aparelhos que determinam o fator de dissipação podem ser usados para determinar Q.

Tabela 3 - Graduação da Mica por Tamanho.

Área Retangular mínima (cm <sup>2</sup> )	Dimensão mínima dos lados (mm)	Produção normal nos EUA (cm)	Especificações		
			ASTM e Indiana	Madagascar	Brasil
650	100	20 x 30	OSEE Especial	0000	OOE Especial
520	100	20 x 25	OEE Especial	000	EE Especial
390	100	15 x 25	EE Especial	00	E Especial
310	100	15 x 20	E Especial	0	Especial
235	89	15 x 15	{ ASTM-A1 Esp. India-Especial	A1	A1
155	76	10 x 15	1	1	1
97	51	8 x 13	2	2	2
65	51	8 x 8	3	3	3
40	38	8 x 10 5 x 8	4	4	4
20	25	4 x 5	5	5	5
15	22	5 x 5 circular	5 1/2	6	5 1/2
6,5	19	Vazado	6	6	6

Tabela 4 - Valores de "Q"

Classificação de acordo com a "qualidade" elétrica.	Formação da Mica	Q <sub>mínimo</sub>	
		A 1 MHz	A 1 KHz
E-1-Especial	L	2500	
	B	2500	1000
E-1	L	2500	
	B	1500	500
E-2	L	1500	
	B	200	200
E-3	L	200	100

L = Lâmina ; B = Bloco

OBS.: - Classificação é feita de acordo com a norma da Índia.

## 2.6 - Sucata de Mica e Mica Triturada

A sucata de mica compreende a mica não utilizada como lâmina (bloco, película ou escama). A sucata resulta de mineração, aparamento ou fabricação de folha de mica e é empacotada e vendida a trituradores de mica sem outros processamentos. Sucata de maior tamanho e melhor qualidade, incluindo - restos de operações de furação, é processada e reconstituída na forma de "papel" de Mica e de "papelão" de Mica.

Mesmo das melhores minas, muita mica é recuperada somente na forma de sucata. As partes externas de certos blocos de mica são trituradas e devem ser cortadas do bloco antes que os mesmos sejam divididos. Defeitos estruturais tornam muitos blocos de mica quase sem valor, mesmo para a fabricação de pequenas folhas comerciais, devido a cristalização -

imperfeita. Na média, só cerca de 3 a 8% da mica na mineração correta é finalmente obtida na forma de bloco completamente acertado ou sem equivalente em películas ou escamas. Ainda mais, quando os produtos são feitos a partir de folhas de mica, muitos retalhos sobram.

Sucata de mica, retirada de mineração corrente de mica de dentro ou de fora da mina, pode ser somente um produto de pegmatite ou um produto secundário de produção de folha de mica; isto varia muito na qualidade. A sucata picada é a mica descartada durante o processo manual de formar folhas de mica. Sucata de fábrica, geralmente material de alta categoria e qualidade, são as sobras obtidas do corte e recorte de folhas de mica em peças de forma e tamanho definidos. A sucata de mica que é recuperada do xisto e do beneficiamento do caolim, feldspar e pegmatites de lítio são muitas vezes referidos como flocos de mica.

A mica granulada é feita a partir da sucata por método de moagem seca ou úmida. Para moagem a seco é mais utilizado o moinho com alta velocidade de martelo ou pulverizadores do tipo desintegrador.

A mica granulada pelo processo úmido é produzida em moinhos do tipo chanfrador para preservar o brilho ou o lustro das mesmas. Esse tipo de moinho consiste em um tanque de aço cilíndrico, que é forrado no fundo com blocos de madeira com sulcos. O pino central gira a uma velocidade que faz com que os rolos de madeira giram à 15 - 30 rpm. O funil de enchimento de sucata é colocado no moinho onde a água é adicionada lentamente para formar uma grossa pasta. Quando o volume de mica foi moído no tamanho desejado, o que requer de 5 a 8 horas, dependendo da qualidade de material colocado, a carga é levada do moinho para recipientes onde é feita a separação das impurezas em grãos. A mica triturada é descarregada em um tanque onde a água é eliminada por centrifugação e a secagem é feita com vapor. O produto é peneirado em um deck fechado com múltiplas peneiras vibratórias e empacotado para embarque.

Especificações para mica moída pelo processo úmido requer que 99,5% passe pela peneira de 180  $\mu\text{m}$  (80 mesh) e - 88% passe através de uma peneira de 45  $\mu\text{m}$  (325 mesh). Especificações para a mica moída pelo processo seco varia de acordo com os diferentes usos e fornecedores. Em geral, a mica moída pelo processo seco deve passar por peneiras de 250 , 180 - ou 150  $\mu\text{m}$  (60, 80 ou 100 mesh).

A produção de mica granulada pelo processo úmido - custa muitas vezes mais do que aquela feita pelo processo seco. A primeira é distinguida pelo seu brilho. A mica moída - pelo processo a seco, parece mais comumente com uma farinha já que as beiradas dos flocos são quebrados e picotados.

## 2.7 - Micas sintéticas de fluor

Comparada com a da natural , a indústria de mica sintética é muito pequena, e por causa do custo e substituição dos produtos de mica em geral, muito provavelmente permanecerá assim no futuro.

Estudos sistemáticos na URSS de 1934 a 1943 forneceram o "back ground" para a síntese moderna de fluorphlogopite que ajudaram na aplicação industrial. Estes estudos reconheceram o papel e a intercambialidade do fluor e da hidroxila na estrutura da mica.

Por volta de 1938, antecipando a necessidade do uso da miça, a síntese de fluorphlogopite foi investigada na Alemanha e Japão. As pesquisas realizadas nos Estados Unidos resultaram no desenvolvimento de diversos processos de produção e síntese de vários tipos de mica. Atualmente a única mica sintética de importância comercial é a fluorphlogopite.

Nas micas de fluor sintética, o fluor substitui o ion hidroxila. São micas verdadeiras e as variedades de potássio tem as características da mica natural e pode ser facil-

mente dividido. As micas de fluor são feitas à pressão atmosférica pela fundição ou por reação de "estado sólido" das matérias primas apropriadas. Devido a falta do ion hidróxido, as micas sintéticas de fluor não se decompõe tão prontamente quanto as micas naturais e tem uma estabilidade térmica muito mais alta. Por substituição iônica, uma grande variedade de micas de fluor pode ser sintetizada, algumas destas tem propriedades diferentes ou bastante incomuns.

Mica sintética com hidroxilas são preparadas em um sistema fechado sob pressão, pois elas se decompõe pelo aquecimento acima de  $500^{\circ} - 600^{\circ}\text{C}$  à pressão atmosférica. Além do que o vapor d'água deve ser mantido para fornecimento de hidroxila para a reação. A cristalização hidrotérmica apresenta problemas devido ao delicado controle dos gradientes de pressão e temperatura requeridas em recipientes selados. Entretanto, muitas micas de hidroxilas tem sido sintetizadas em laboratório, sendo que o tamanho das partículas e o rendimento do processo tem sido muito pequeno e seu custo muito alto para qualquer aplicação comercial. A vantagem da substituição completa dos hidroxilas por fluor é que a segunda pode ser cristalizada daquela fundida à pressão atmosférica.

## 2.8 - Propriedades

As propriedades da fluorphlogopite são dadas na tabela 2. Em geral, as propriedades físicas, elétricas e química da fluorphlogopite são similares àquelas dos melhores graus de qualidade da muscovite natural ou phlogopite. As unidades de cristais de fluorphlogopite são claros e transparentes. As diferenças principais são a alta estabilidade ao calor ( $\text{mp} = 1387^{\circ}\text{C}$ ) e a alta pureza de fluorphlogopite que contém menos que 0,04% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

### 2.9- Relações entre Fases

O ion fluor é essencial para a síntese de "fluormicas". Sem uma quantidade de fluor presente, a mica é formada em quantias menores.

A quantidade teórica de fluor necessário deve ser de 4 ions de fluor para 1 de fluorphlogopite ( $K_2Mg_6Al_2Si_6O_{20}F_4$ ). Comumente, um ligeiro excesso de fluor compensa uma pequena mas inevitável perda de fluor devido a volatilidade do HF,  $AlF_3$ ,  $SiF_4$  e KF. O HF é derivado da reação do fluor com a água absorvida presente nos materiais em estado natural no solo.

Um excesso de fluor em torno de 12% em mol é usualmente satisfatório, isto é,  $F_{4,5}$  ao invés de  $F_4$  na fórmula acima. Excessivas quantidades de fluor na composição da fórmula dá lugar a maiores quantidades de fases cristalinas secundárias (particularmente MgFe) mais vidro.

Fluorphlogopite é preparada facilmente em pequenas- ou grande quantidades do fluorsilicato de potássio, feldspato, magnésio, alumínio e areia de quartzo. Materiais primas finas - (100 mesh) ou mais finas que isso são misturadas e aquecidas à temperaturas acima de fundição ( $1387^{\circ}C$ ). Cristalização em cadiinhos pode ser conseguido pela parada de aquecimento e deixando o "forno" esfriar naturalmente ou por redução de temperatura programada. Cristais maiores são obtidos através de um resfriamento lento (abaixo de  $5^{\circ}$  e preferencialmente  $1^{\circ}C/h$ ) através da cristalização. Fluorphlogopite tem sido feito em lâminas - maiores que  $7,5 \times 12,5$  cm.

Carbonato de potássio pode ser usado se o sódio do feldspato não entrar na estrutura da mica, isto acontece se tiver potássio suficiente; dessa forma, este sódio forma fases secundárias tais como  $NaMgF_3$ .

Com matérias primas puras, grandes quantidades de "fluormicas" sintéticas podem ser produzidas facilmente em alta e reproduzível pureza

### 2.10- Receptores e Cadrinhos

Os melhores cadrinhos para fundição de "fluormica" são feitos de platina ou grafite. A massa cristalizada ajunta-se com a platina mas pode ser desalojada facilmente de um cadrinho cônico de grafite. O cadrinho de grafite é protegido da oxidação se colocado dentro de um cadrinho de argila que é fechado com uma tampa. Outros materiais utilizados para a confecção de cadrinhos são o carbureto de silício, nitrato de silício, óxido de magnésio ou nitrato de alumínio. Entretanto, estes devem ser quebrados para remover a "fluormica" fundida.

Cadrinhos de argila denso consomem-se facilmente e não devem ser usados para longos aquecimentos, mas são satisfatórios para aquecimentos curtos com substâncias reduzidas. Todo e qualquer tipo de cadrinho deve ter uma tampa que se encaixe bem.

### 2.11- Fundição com Resistências Internas

As fluormicas são preparadas por fundição ou reação de estado sólido das matérias primas em pressão atmosférica. Para produção em larga escala, até 45 toneladas métricas, uma fornalha elétrica de resistência interna é empregada. Ela consiste num recipiente para conter o composto, um par de eletrodos posicionados para gerar calor por resistência elétrica na parte central do interior da composição e um transformador variável para suprir a corrente elétrica à potência apropriada.

Ambos os tipos de paredes da fornalha - simples e dupla - são empregadas; a primeira é refrigerada por casca d'água com ambos os eletrodos na vertical sendo que a posição dos mesmos na partida é mostrado na figura 1. A forna-

lha é enchida com uma composição previamente misturada.

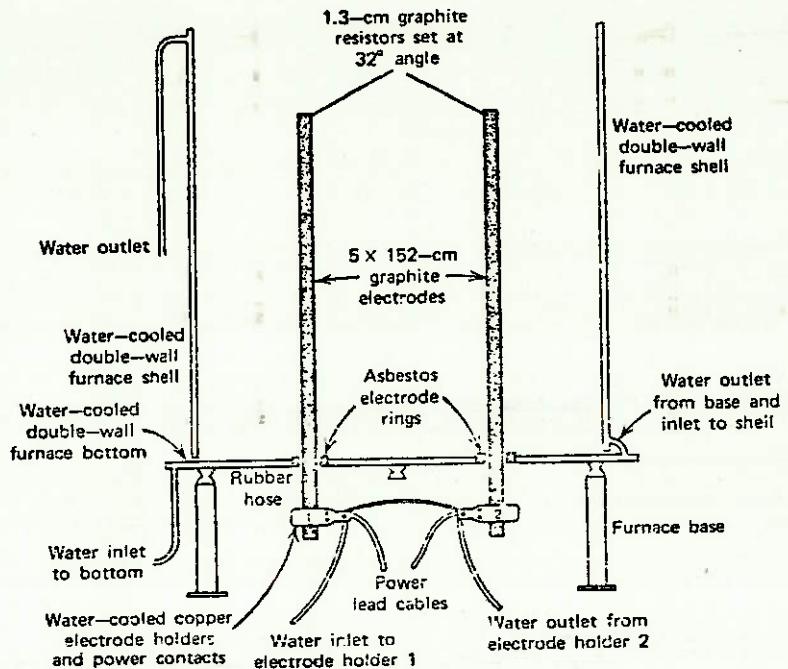


Fig.1 - Fornalha elétrica de resistência interna,  
refrigerada a água e de parede dupla.

Quando a mistura do banho alcança o nível máximo para partida dos eletrodos, cerca de 150g grafite em pó ou "negro de fumo" é colocado no banho a fim de se formar uma corrente elétrica contínua entre os eletrodos. A fornalha então é enchida até cerca de 30cm acima dos eletrodos, sendo que os mesmos perfilam-se de 5 a 10 cm em diâmetro. As paredes e o fundo das fornalhas são constituídos de folhas de ferro laminadas a frio e aço inox.

A fundição é iniciada aplicando-se 10 a 15 Volts e cerca de 100 A numa fase simples, potência a-c. Uma voltagem

de até 30 Volts pode ser aplicada após algumas horas. Quando a fundição alcançar os eletrodos principais, os eletrodos de partida já queimaram, a resistência aumenta e uma potência maior deve ser aplicada. Neste ponto, os valores típicos da potência para 3 a 9 toneladas de fundição são 100 Volts e 200 a 300 A. Se a fundição ocorre muito rapidamente nas primeiras etapas, o material fundido espalha-se na metade superior da fornalha e não purga o suficiente para que a fundição ocorra de uma maneira rápida e total. Quando a fundição está bem encaminhada, a potência pode ser aumentada para 20 a 50 Kw em pequenas fornalhas ou até 150 a 300 Kw para fornalhas maiores.

Neste ponto, uma quantidade da mistura que compõe o banho é adicionada ao mesmo através do buraco existente no alto da fornalha, sendo que mais matéria prima também é adicionada. A alimentação em etapas impede um aumento muito grande na resistência elétrica. Os vapores, constituídos de fluoretos de K, Al e Si, não devem ser inalados. Um forro de folhas de alumínio, de 0,81 mm de espessura, aumentam bastante a vida das fornalhas e impede que o material que esteje sendo fundido seja contaminado por partículas de ferro ou de materiais adulterados.

Para se obter um bom rendimento na fundição, a fornalha deve ser refrigerada a água. Pontos quentes em fornalhas de paredes simples devem ser resfriados no local e, se necessário a potência deve ser cortada por poucos minutos. A fundição é feita até que o líquido alcance uma cota de 30 a 40 cm acima do fundo. A potência então é cortada e a fornalha é resfriada naturalmente.

Cerca de 900 gramas de fluormica por Kwh é obtida através desse processo.

Fundição para uma carga acima de 3/toneladas deve ser feita empregando-se uma potência trifásica e eletrodos de partida. Esse processo em si não possui nenhuma dificuldade significativa de operação.

### 2.12- Fundição com Resistência em Arco

Para fundição com resistência elétrica em arco, fornálias de parede simples levemente cônicas são as mais utilizadas (ver figura 2). Ela é resfriada externamente por uma casca d'água. Os dois eletrodos de grafite são colocados por cima e são erguidos durante o processo.

No começo, a matéria prima misturada ou a fluormica é colocada no fundo da fornalha, sendo que o material colocado alcança uma altura de 30cm. O arco é iniciado e uma pequena quantidade de material fundido é obtida. A composição misturada é então acrescentada em pequenas porções e a potência é aumentada. Depois de iniciar, a composição misturada é adicionada em quantidade suficiente para cobrir o líquido em cerca de 30cm. Se uma crosta é formada, ela é quebrada, empurrada para baixo e uma quantidade a mais de mistura é adicionada. Alimentação, aumento de potência e elevação dos eletrodos são as medidas tomadas até que o forno esteje quase cheio. Neste momento, os eletrodos são removidos, a composição atinge o topo e a operação do forno é interrompida.

Durante a principal operação de fundição, os eletrodos são mergulhados cerca de 30 a 45 cm no líquido. A potência de entrada pode variar de 80 a 140 V à 1000 A ou mais. O fornecimento de fluormica pode ser de 1,5 kgf/Kw.h ou mais. Se os eletrodos forem separados tanto quanto possível, o produto é quase branco e possui uma menor contaminação de carbono do que se os eletrodos estiverem espaçados mais perto.

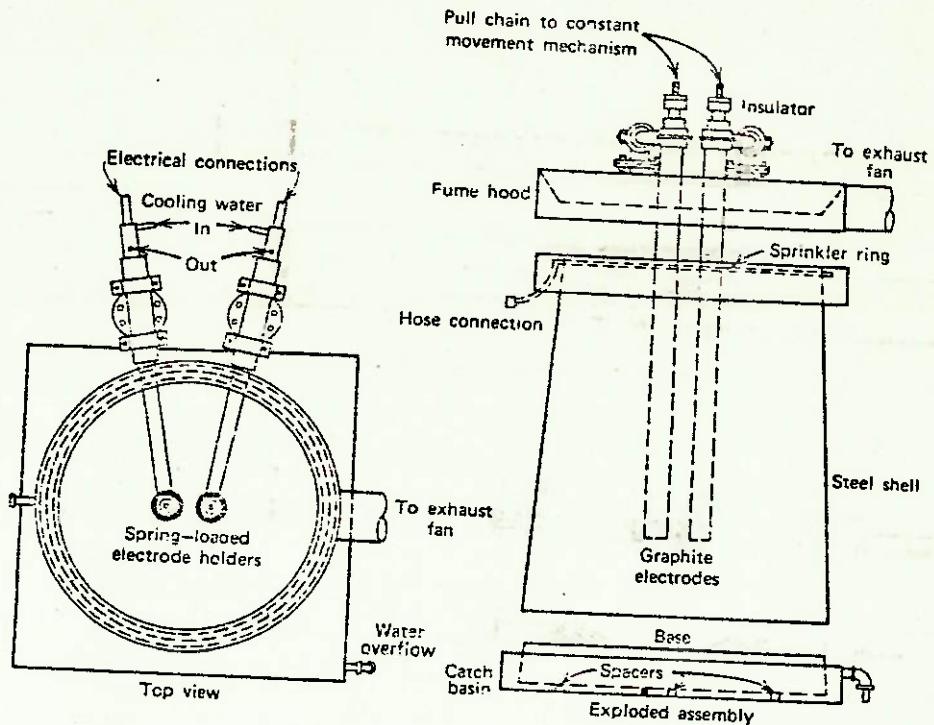


Fig.2 - Fornalha de resistência elétrica, resfriada por cascata d'água.

### 2.13- Reação por Estado Sólido

As fluormicas também podem ser preparadas pela reação de estado sólido. Fluormuscovite pode ser sintetizada à temperatura de 600 a 700°C mas não é uma fundição estável.

O material de início é uma mistura de fluoretos, fluorsilicatos, óxidos, carbonatos, silicatos e outros componentes finamente divididos ( $75 \mu\text{m}$ ) em uma proporção estequiométrica apropriada. Um ligeiro excesso de fluoreto é desejado (12,5% em mol). Embora usualmente não seja necessário, sólidos altamente reativos, tais como argila desidratada a 800°C, e levemente calcinados podem ser utilizados.

Reações de estado sólido fornecendo fluormicas inici-se a 800°C ou menos. Entretanto, 1000 a 1100 °C é preferido devido a uma grande taxa de aumento. Os recipientes podem ser construídos de qualquer material que suporte tais temperaturas desde que as reações com o material do recipiente seja quase insignificante. Para impedir a perda de fluoretos, o recipiente é coberto bem firmemente. Algumas matérias primas, principalmente aquelas mais usadas para sintetizar a fluorphlogopite, expandem durante uma reação de estado sólido e podem quebrar um grande e rígido cadinho, especialmente se a composição tenha sido compactada firmemente antes do aquecimento.

#### 2.14 - Tamanho e Qualidade do Produto

Ambos, processos de fundição por resistência interna e em arco produzem uma típica fluormica clara e cristalina com apenas pequenas quantidades de fases secundárias, com rendimentos maiores que 97%. Sob condições próprias, o produto deve ser quase branco e livre de contaminação de carbono.

Cristais de até 10 x 13 cm tem sido feitos em fundições mas com um fornecimento pequeno e imprevisível. Entretanto, para aplicações especiais, cristais claros, 2,5 cm ou maiores, são separados e vendidos. Pelo fato de que o lingote de mica é uma massa dura de cristais interligados, a separação dos mesmos sem danificar é difícil. Parece que cristais isolados aparecem no líquido antes da cristalização principal. Desde que na ausência de um alto gradiente térmico seu crescimento é mais ao acaso do que contínuo, bolsas de líquido são deixadas, o que limita seriamente o tamanho do cristal de fluormica remanescente.

### 2.15- Moagem

O lingote de mica pode ser quebrado com explosivos <sup>quebra</sup> seguido pelo martelo de ar ou britador. Para a mica incrustada com vidro ou outras aplicações o material pode ser moído - em um moinho de martelo, moinho com jato de impacto ou moinho vibratório ou ainda os processos úmido e seco.

### 2.16 - Produtos Especiais

#### 2.16.1 - Mica composta

A Mica composta é a lâmina ou folha constituída de camadas alternadas de escamas sobrepostas e ligações próprias, que são consolidadas pelo calor e pressão. Temperaturas de até 150 °C ou mais são utilizadas, bem como pressões de 3,4 a 68 atm.

Os fabricantes de mica composta seguem um número de passos, sendo que o mais crítico é o da distribuição das escamas em camadas finas sobrepostas de espessura uniforme e homogênea. Cada camada não deve ter uma espessura maior que 25, 50 ou 75  $\mu\text{m}$  e deve ser tão homogênea e uniforme quanto possível sem aberturas ou manchas grossas. Antigamente esta operação era feita em grande parte a mão, sendo que hoje em dia um aparelho de sucção mecânica é empregado para manusear escamas soltas e secas.

O tipo e a proporção do aglutinador que é utilizado varia de acordo com a finalidade para qual o material composto é destinado. Os aglutinadores mais utilizados contém Verniz, Epoxi, Poliéster, Alkyd vinyl e resinas de silicone dissolvidas em solventes próprios para pronta distribuição.

### 2.16.2 - Glass-Bonded Mica

A glass-bonded mica é um material composto que combina a habilidade de moldar do vidro com as propriedades elétricas superiores de mica. Esse tipo de mica é trabalhável e superfícies polidas com pequenas tolerâncias dimensionais são obtidas. A glass-bonded mica não sofre alterações com o tempo, sendo portanto bem estáveis. Esse tipo de mica não carboniza ou deixa marcas com um arco e não é afetada pelo oxigênio, ozono ou contaminantes existentes na atmosfera. Inserções metálicas podem ser moldadas no local, e através de técnicas apropriadas o produto pode receber uma película superficial condutora.

Esse tipo de mica pode ser feito tanto com mica natural ou com mica sintética ou com uma combinação de ambas. Os vidros podem ser de borato de chumbo ou de borasilicato de chumbo para a mica natural e de silicato de chumbo ou alumínio ou outros silicatos para fluormicas sintéticas. A estabilidade a altas temperaturas de fluormica permite o uso de vidros para altas temperaturas, os quais possuem melhores qualidades elétricas.

Normalmente, mica de 250 µm é misturada completamente com vidro em pó de 75 µm e 5 a 10% de água. A mistura é prensada a frio em formas que são então secas ou aquecidas lentamente a 50 - 1100°C, e então são transferidas rapidamente para um molde ou matriz a 340°C. Uma pressão de 34 a 69 MPa (4900 a 10000 psi) é aplicada imediatamente. As peças moldadas são então recozidas. Possíveis inserções metálicas são colocadas na matriz anteriormente. O processo é muito similar ao de moldagem de plásticos.

A Glass Bonded mica pode ser serrada, perfurada, triturada, colocada no forno mecânico ou moída. Praticamente, quase todas as operações mecânicas podem ser realizadas na Glass-Bonded mica.

### 2.16.3 - Mica com Fosfato

Uma folha de mica resistente ao calor envolvida em solução de fosfato de alumínio é feita de mica triturada por aplicação de temperatura elevada e pressão. Pode ser perfurada (vazada) após formada ou feita em várias formas. A mica com fosfato é usada em aquecedores elétricos e em outras aplicações requerendo um forte isolador resistente ao calor.

### 2.16.4 - Folha ou papel de mica recuperada

A Folha ou papel de mica recuperada é feita de pequenos e finos flocos ou plaquetas de mica. Possui a mesma estrutura sobreposta como a mica composta mas em menor escala. Os flocos no papel de mica recuperada são usualmente em torno de 150 a 850  $\mu\text{m}$  (100 - 20 mesh), menos que 1 mm na sua maior dimensão. Na maioria dos papéis de mica as partículas de 150 $\mu\text{m}$  são mantidas a um índice mínimo ou são eliminadas. Apesar de semelhante em aparência ao papel de celulose, o papel antes de ser trabalhado é 100% mica.

O papel de mica é feita de uma pasta fluída numa máquina de papel "Fourdrinier" modificada. O papel de mica produzido é contínuo, uniforme, flexível, suficientemente fortes e de até 1 m de largura. Tem uma resistência dielétrica de 24 V/ $\mu\text{m}$  ou mais, uma resistência a tensão de 6,9 a 20,7 MPa (100 a 3000 psi) ou mais, uma variação na espessura menor que 10%, uma resistência à choques térmicos e mecânico, não são inflamáveis, um baixo fator de potência e uma alta resistência à radiação. Em outras palavras, possui as excelentes propriedades de mica da qual é feita. A folha de mica contínua pode ser tão fina quanto 12 a 25  $\mu\text{m}$  mas espessuras de 25 a 100  $\mu\text{m}$  são mais comuns e são preparadas por laminação.

Antes de ser usado, muitos papeis de mica ou laminados são envolvidos com resina, silicone, vidro ou fosfato

de borato. O produto compete com a mica composta e é superior a mesma em muitos aspectos. Tem sido usado com muito sucesso como punção para tubos de eletrons.

A pasta fluída de partículas de mica é preparada por um dos dois processos gerais.

O processo de Heyman ou processo integrado de mica tem as vantagens das superfícies virgens ou nascentes da mica serem finamente cortada. A mica é cortada por jatos d'água em alta velocidade, agindo como uma faca num disintegrador de alta velocidade, não tendo nenhuma parte mecânica movimentando-se. O desintegrador é formado de várias câmaras uma sobre a outra. A mica é colocada no fundo da câmara através de um funil por um vibrador automático. Nos lados e em cima da câmara, jatos dão à água um movimento rotativo. As partículas de mica suspensas são jogadas fora por uma força centrífuga e são orientadas paralelamente às paredes da câmara. Os jatos cortam os rodopiantes flocos de mica em finas partículas. Finos flocos são erguidos nas sucessivas câmaras, uma mais alta que a outra, e quando estão bastante finos saem do sistema. A mica então é colocada num tanque onde pode ficar e descansar calmamente sobre uma correia. A correia passa sobre uma caixa de sucção e em torno de um anel a vácuo para retirar a maior parte da água. A folha úmida passa então através de um secador onde é seca. A folha pronta normalmente é impregnada de resina própria.

No processo Samica ou Bordet, a sucata de mica limpa é aquecida para uma desidratação parcial. A mica quente é temperada em solução alcalina. Após o resfriamento o excesso de solução é drenado e a mica é imersa numa solução diluída de ácido sulfúrico. A reação entre as soluções alcalina e ácida gera um gás entre as lâminas de mica, causando na mesma uma grande expansão. Nesse ponto, a lâmina de mica requer somente uma lavagem e uma agitação apropriada para se tornar adequada para a produção de papel de mica.

Papel de mica recuperado combinado com outros materiais em folha são laminados para aplicações especiais. Entre

estes estão o tecido de algodão, película de poliéster, tecido de vidro e tecido silicone polido.

#### 2.17 - Substitutos da Mica

Os substitutos básicos para as folhas de mica incluem a mica composta, a folha de mica recuperada (papel de mica), a mica com fosfato e a glass-bonded mica. Ainda nenhum processo tem sido desenvolvido para a produção de grandes cristais de mica sintética. Diversos materiais não baseados em mica são utilizados como substitutos de mica natural, incluindo cerâmicas de alumina, betonite, vidro, quartzo fundido, talco e polímeros de silicone. Substitutos de mica orgânica inclui polietrafluoretileno, nylon, poliestireno e Mylar. Nenhuma dessas combinações substitui totalmente as propriedades elétricas e térmicas da mica natural.

Sistemas e componentes alternativos, tais como dispositivos de estado sólido, capacitores de cerâmica e miniaturização tem reduzido a necessidade da mica, uma tendência que se espera que se continue no futuro. Entretanto, devido à algumas de suas propriedades elétricas e térmicas serem exclusivas, a lâmina de mica manter-se-á ligada à necessidade para alguns itens tais como indicador de nível, diafragmas e aplicações especiais.

#### 2.18 - Saúde e Fatores de Segurança

Atualmente, nenhum risco de saúde específico causado pela mica foi estabelecido. Seu entrelaçamento cristalino não produz fibras, embora alguns depósitos possam conter fibras de outros materiais como impurezas.

Granuloma e fibrogenesis, causados pelo pó de mica nos homens, são notados só depois de uma exposição muito prolongada em grandes concentrações.

A mica não tem sido identificada como cancerígena, clínica ou experimentalmente.

## 2.19 - O Uso da Mica

### 2.19.1 - Lâminas de Mica. Blocos e Películas

Os vários usos de lâminas de mica tem por vantagem as suas propriedades de isolamento térmico e elétrico, e a sua facilidade de ser cortada, perfurada ou estampada com ótimas tolerâncias.

Indústrias elétricas e eletrônicas são os principais consumidores de lâminas de mica; a maior parte do consumo de blocos e películas de mica destina-se à fabricação de espaçadores para tubos de vácuo. Esses espaçadores servem para posicionar, isolar e apoiar os elementos do tubo dentro do invólucro. Apoio de mica é usado nos canos de escapamento, em cima e no fundo para dar rigidez aos condensadores. Blocos de mica são fabricados em lavadoras de vários tamanhos para agir como isoladores em aparelhos eletrônicos.

Transparentes e extremamente planas, certas peças de mica de alta qualidade são usados para forrar indicadores de nível de caldeiras de vapor de alta pressão.

Diafragmas para equipamentos de oxigênio são feitas de blocos de muscovite de alta qualidade. Outros usos incluem o dial marcador para compassos de navegação, parâmetros, reguladores térmicos, janelas de microondas e elementos de secadores de cabelos.

Um processo tem sido desenvolvido para revestir lâminas de mica de alta qualidade com ouro e prata em moldes específicos. Estes discos revestidos e lâminas estampadas são usados em dispositivos de comunicação.

Em laser de helio e neon, lâminas de micas naturais de alta qualidade são usadas como placas de retardamento. Vários industriais tem usado a mica como filtro ótico especial. Lavadores de mica tem sido usados extensivamente pela indústria de computadores. Os pequenos e finos discos de mica servem como separadores de espaço em cabeças de gravadores.

A superfície plana da lâmina de mica utilizada como separador e outras especialidades deve ser clara, sem arranhões e não deve ser tocada pelas mãos. Discos são estampados das lâminas, recolhidas, coladas com papeis de separação e colocadas em montes. Os montes são colocados num torno mecânico e usinados nos diâmetros desejados para servir às pequenas tolerâncias exigidas pelo consumidor.

Phlogopite é inferior à muscovite em várias propriedades elétricas mas toma o lugar da muscovite como isolador onde sua capacidade em resistir a temperatura acima de 1000 °C se faz necessária, já que a muscovite resiste somente até 500°C.

#### 2.19.2 - Escamas e micas compostas

Micas compostas feitas de escamas servem como substituto para lâminas naturais em aplicações de isolamento elétrico. Mica composta é a mais usada das lâminas de mica e é indispensável como isolamento médio na indústria elétrica. É usada como chapas de divisão, chapas moldadas, chapas flexíveis, chapas de aquecimento e fitas.

As chapas de divisão, que é o uso mais difundido da mica composta, age como isolador entre os segmentos de comutador de cobre de motores e geradores universais d-c.

Chapas moldadas são as lâminas das quais os anéis-V são cortados e estampados para o isolamento de segmentos de cobre do cabo de aço no fim do comutador. Chapas moldadas são também fabricadas em tubos e anéis para isolamento em transformadores, armaduras e partidas de motores.

Chapas flexíveis são usadas em motores elétricos e armaduras de geradores, isolamento de bobinas e no isolamento do magneto e do caroço de comutador.

Chapas de aquecimento são usadas onde uma isolamento altamente resistente à altas temperaturas se faz necessária.

Em alguns tipos de micas compostas, as escamas ligadas são reforçadas com lã de vidro, película de poliéster, esteiras de Dacron e lã de vidro esmaltado. Estes produtos são bem flexíveis e são produzidos em longas e contínuas lâminas que são embaladas em rolos ou primeiro cortadas em fitas, tapes ou qualquer outra dimensão desejada.

#### 2.19.3 - Sucata, flocos e mica triturada

Alta qualidade de sucata de mica é laminada e usada para produção de papel de mica. Mica triturada é usada primeiramente em quadros de gesso onde a mica age como enchimento e prolongador no cimento. Mica triturada é usada na produção de fôrros de telhado e cascalho de asfalto.

A mica serve como enchimento interno e revestimento de superfície para prevenir aderência de superfícies adjacentes. O revestimento não é absorvido pelo novo telhado porque a mica tem uma estrutura entrelaçada e não é afetada pelo asfalto ou pela ação de agentes atmosféricos.

Mica triturada é usada como um pigmento prolongado que facilita a suspensão, reduz o controle e o débito, impede o encolhimento e corte da película pintada, aumenta a resistência de água e dá brilho ao tom dos pigmentos coloridos.

Na indústria de borracha, a mica triturada é usada como enchimento interno e lubrificante de moldes, na manufatura de borracha modelada em produtos como pneus. Os usos na indústria plástica são similares onde a mica triturada age também como agente reforçador.

Outros usos incluem revestimentos decorativos em papel de parede e concreto, estuque e superfícies de ladrilho, como um ingrediente em graxas especiais; como revestimento para interiores de moldes em fundição de metais.

No futuro, um possível uso para mica triturada pode ser no controle da infestações de pulgões.

#### 2.19.4 - Glass Bonded Mica

Glass Bonded mica produzida com mica natural ou sintética é usada numa grande variedade de moldes e lâminas para isolamento elétrico, de controles de tempo para máquinas de lavar automática às mais exóticas aplicações espaciais. Estão incluídas aplicações estratégicas onde condições inusitadas de ambiente como partes girantes, engrenagens de somar, computadores, radar, equipamentos de comunicações e equipamento nuclear.

#### 2.19.5 - Lâminas ou papel de mica recuperada

Muitos tipos diferentes de material de isolamento baseados em papéis de mica, desde rígidas chapas para segmentos de comutadores, obtidas através de deformações à quente ou a frio, até fitas reforçadas e flexíveis, invólucros e lâminas compostas para tubos à vácuo, são utilizados hoje em dia.

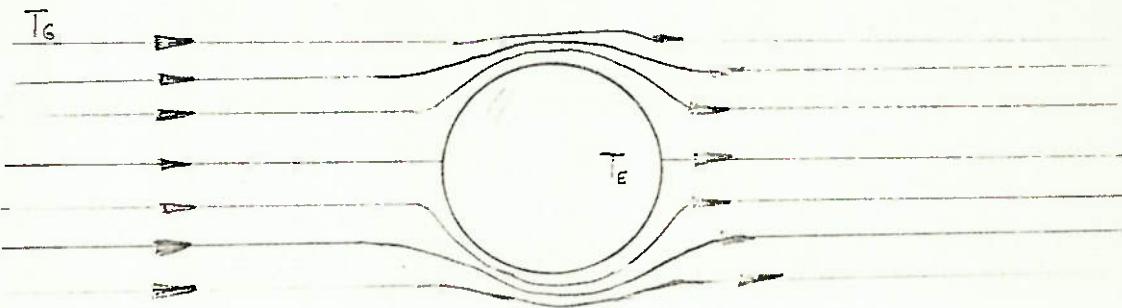
Os maiores usos de mica são em armaduras de bobinas d-c, estruturas de bobinas a-c e transformadores da classe 180.

### 3. MODELO TEÓRICO

Hipóteses:

- No início do processo, a temperatura da esfera,  $T_E$ , é igual a  $30^\circ\text{C}$  e é uniformemente distribuída.
- Durante o processo, a superfície da esfera encontra-se sempre saturada.
- A temperatura da esfera é uniforme em qualquer instante durante o processo.
- A temperatura do gás de secagem,  $T_G$ , é constante e igual a  $100^\circ\text{C}$ .
- $\bar{h}$  é constante durante o processo.
- O gás de secagem utilizado será o ar.

#### 3.1 - Balanço de energia.



$$\bar{h} A(T_G - T_E) = \dot{m}_a h_{LV} + \rho C V \frac{dT_E}{dt} \quad (1)$$

onde:

$s$  = densidade de mica = cte.

$C$  = calor específico da mica = cte.

$V$  = volume da esfera de mica = cte.

$\bar{h}$  = cte.

$h_{LV} = h_{LV}$  médio entre  $30$  e  $100^\circ\text{C}$

$A$  = superfície de troca = cte.

$T_G$  = temperatura do ar escoando = cte.

$T_E = f(t)$

$\dot{m}_a$  = massa de água que deixa a esfera.

### 3.2 - Massa de água que deixa a esfera, $\dot{m}_a$

$$\dot{m}_a = K_p \cdot \rho \cdot A \left( \frac{P_v - P_\infty}{P_T - P_v} \right) \quad (2)$$

onde:

$K_p$  = coeficiente de difusão

$A$  = área da esfera

$\rho$  = densidade do ar

$P_v$  = pressão de saturação do vapor d'água na superfície de esfera  $f(T_E)$ .

$P_\infty$  = pressão parcial do vapor d'água no ar, admitido como cte.

$P_T$  = pressão total do ar = 1 atm

$\dot{m}_a$  = massa de água que deixa a esfera

### 3.3 - Cálculo do coeficiente de difusão, $K_p$

Segundo Bennet & Myers sabemos que:

$$\frac{K_p \cdot D}{D_{Ab}} = 2 + 0,6 \left( \frac{\mu}{\rho D_{Ab}} \right)^{1/3} \left( \frac{D \cdot u \cdot \rho}{\mu} \right)^{1/2} \quad (3)$$

onde:

$D_{Ab}$  = difusividade da água no ar, ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

3.4 - Cálculo da pressão de saturação  $P_s$  em função da temperatura da esfera,  $T_E$

Considerando a equação de Clapeyron para baixas pressões:

$$\left( \frac{dp}{P} \right)_{sat} = \frac{h_{LV}}{R} \left( \frac{dT}{T^2} \right)_{sat}$$

Integrando entre 2 pontos 1 e 2 quaisquer, supondo  $h_{LV}$  e  $R$  cte., teremos:

$$\begin{aligned} \int_1^2 \frac{dp}{P} &= \frac{h_{LV}}{R} \int_1^2 \frac{dT}{T^2} \\ \ln \frac{P_2}{P_1} &= \frac{h_{LV}}{R} \left( \frac{T_2 - T_1}{T_2 \cdot T_1} \right) \\ \frac{P_2}{P_1} &= e^{\frac{h_{LV}}{R} \left( \frac{T_2 - T_1}{T_2 \cdot T_1} \right)} \\ P_2 &= P_1 e^{\frac{h_{LV}}{R} \left( \frac{T_2 - T_1}{T_2 \cdot T_1} \right)} \end{aligned} \quad (4)$$

Adotando um par de valores  $(P_1, T_1)$  de saturação, para qualquer valor de  $T_2$  obteremos a correspondente pressão  $P_2$  de saturação.

O  $h_{LV}$ , como varia em função da temperatura, deve ser adotado como constante, sendo o mesmo o correspondente a temperatura média do intervalo em estudo.

### 3.5 - Cálculo do tempo total de secagem

Conhecendo-se a massa total de água que se deseja evaporar, poderemos determinar o tempo total para isso através da equação (5).

$$m_{\text{total}} = \int \dot{m}_a dt \quad (5)$$

### 3.6 - Cálculo do $\bar{h}$

Segundo Kreith:

$$\frac{\bar{h} \cdot D}{K} = 2 + (0,4 Re_D^{0,5} + 0,06 Re_D^{0,67}) P_r^{0,4} \left( \frac{\mu_s}{\mu_\infty} \right)^{0,25} \quad (6)$$

OBS:- Pode-se notar facilmente a semelhança entre os processos de transferência de calor e de massa pela similaridade das equações 6 e 3 para o cálculo dos coeficientes de difusão e transmissão de calor respectivamente.

### 3.7 - Procedimento para o cálculo do tempo necessário para secagem.

1º) Com as hipóteses admitidas e os valores adotados para  $T_E$ ,  $T_G$ , diâmetro da esfera  $D$ , velocidade do ar  $v$  e  $(P_1, T_1)$  para a equação de Clapeyron, podemos calcular:

- da eq. 6 -  $\bar{h}$
- da eq. 3 -  $K_p$
- da eq. 4 -  $P = f(T_E)$

2º) Com  $K_p$  e  $P = f(T_E)$  na equação (5), obtemos:

$$\dot{m}_a = f(T_E)$$

3º) Substituindo  $\dot{m}_a = f(T_E)$  na equação (1), obtemos:

$$T_E = f(t)$$

Com isso, obtemos  $\dot{m}_a = f(t)$ .

4º) Com  $\dot{m}_a = f(t)$  na equação 5, obtemos o tempo total de secagem uma vez estabelecido a massa total de água a蒸发 porar.

#### 4. APLICAÇÃO DA TEORIA NUM CASO REAL

##### 4.1 - Valores Adotados

- Temperatura inicial da esfera:  $30^{\circ}\text{C}$
- Temperatura da corrente de ar:  $100^{\circ}\text{C}$
- Diâmetro da esfera:  $D = 5 \times 10^{-3} \text{ m}$
- Velocidade da corrente de ar:  $U = 5 \text{ m/s}$

##### 4.2 - Cálculo de $\bar{h}$

Segundo Kreith para o escoamento sobre esferas, - equação 6:

$$\frac{h \bar{D}}{K} = 2 + (0,4 \text{ } Re_D^{0,5} + 0,06 Re_D^{0,67}) Pr^{0,4} \left( -\frac{\mu_s}{\mu_\infty} \right)^{0,25}$$

para o ar a  $100^{\circ}\text{C}$ :

$$\mu_\infty = 2,185 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$$

$$\rho = 0,916 \text{ kg/m}^3$$

$$Pr = 0,70$$

$$K = 0,0272 \text{ kcal/m.h.}^{\circ}\text{C}$$

para o ar a 30 °C

$$\mu_s = 1,862 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$$

Como os valores acima obtemos um  $Re = 1048$  e chega mos a um  $H = 98,275 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}$

#### 4.3 - Cálculo de K<sub>ρ</sub>

De acordo com a equação 3:

$$\frac{K\rho \cdot D}{D_{Ab}} = 2 + 0,6 \left( \frac{\mu}{\rho D_{Ab}} \right)^{1/3} \left( \frac{D \cdot u \cdot \rho}{\mu} \right)^{1/2}$$

onde:

$$\rho = 0,059 \text{ lb/ft}^3$$

$$\mu = 0,058 \text{ lb/ft.hr.}$$

$$u = 5 \text{ m/s} = 16,4 \text{ ft/hr.}$$

$$D_{Ab} = \text{difusividade da água no ar} = 0,260 \text{ cm}^2/\text{s} = 0,86 \text{ ft}^2/\text{hr}$$

$$D = 5 \times 10^{-3} \text{ m} = 1,52 \times 10^{-2} \text{ ft.}$$

Substituindo os valores acima na equação 3, obtemos:

$$K\rho = 131,28 \text{ ft/hr} = 1,2 \text{ cm/s.}$$

#### 4.4 - Estabelecimento da P = f(T)

Da equação 4 :

$$P_2 = P_1 \cdot e^{-\frac{h_{LV}}{R} \left( \frac{T_2 - T_1}{T_2 \cdot T_1} \right)}$$

$$\text{Adotando: } T_1 = 99,1 \text{ °C} = 372,1 \text{ °K}$$

$$P_1 = 1,0 \text{ kgf/cm}^2$$

$$h_{LV} = 560,5 \text{ kcal/kg}$$

$$R \text{ para o vapor d'água} = 47 \text{ kgf m/kg}^{\circ}\text{K}$$

logo, substituindo os valores acima:

$$P = e^{13,69 \left( \frac{T - 372,1}{T} \right)} \quad (7)$$

#### 4.5 - Erro Decorrente da Utilização da eq.(7)

$$P = e^{13,69 \left( \frac{T - 372,1}{T} \right)}$$

Temperatura	Pressão ( $\text{kgf/cm}^2$ )		Erro (%)
	Real	Obtida	
30	0,04325	0,04407	+ 1,88
35	0,05733	0,05790	+ 0,98
40	0,07520	0,07540	+ 0,27
45	0,09771	0,09739	- 0,33
50	0,12578	0,12480	- 0,79
55	0,16051	0,15872	- 1,13
60	0,2031	0,2004	- 1,35
65	0,2550	0,2513	- 1,48
70	0,3177	0,3130	- 1,49
75	0,3931	0,3875	- 1,45
80	0,4829	0,4768	- 1,29
85	0,5894	0,5832	- 1,06
90	0,7149	0,7095	- 0,76
95	0,8619	0,8585	- 0,89
100	1,0332	1,0336	+ 0,04

#### 4.6 - Cálculo da pressão parcial do vapor d'água no ar

Hipótese: Supor que o ar utilizado é recolhido a  $30^\circ\text{C}$  e com  $\varnothing = 60\%$  e aquecido à pressão constante de 1 atm até  $100^\circ\text{C}$ .

$$\phi = \frac{P_v}{P_g} \rightarrow 0,6 = \frac{P_v}{0,04325}$$

$$\therefore P_v = 0,02595 \text{ kgf/cm}^2$$

Nessas condições, a temperatura de orvalho é cerca de 20 °C. Portanto, o vapor está superaquecido.

Se a mistura (ar + vapor d'água) é aquecida a pressão constante, a pressão parcial do vapor d'água permanece constante e igual à 0,02595 kgf/cm<sup>2</sup>.

Logo, a 100 °C :

$$\phi = \frac{0,02595}{1} = 0,02595$$

$$\phi = 2,59\%$$

#### 4.7- Massa de água que deixa a esfera, $\dot{m}_a$

Da equação 2 temos:

$$\dot{m}_a = K_p \cdot \rho \cdot A \cdot \left( \frac{P_v - P_\infty}{P_T - P_v} \right)$$

onde:

$$K_p = 1,2 \text{ cm/s}$$

$$P_\infty = 0,02595 \text{ kgf/cm}^2$$

$$A = 7,854 \times 10^{-1} \text{ cm}^2$$

$$P_v = \text{obtida da equação 7}$$

$$\rho = 3,45 \times 10^{-5} \text{ gmol/cm}^3$$

logo, substituindo os valores acima obtemos:

$$\dot{m}_a = 3,25 \times 10^{-5} \left[ \frac{e^{\frac{13,69(T - 372,1)}{T}} - 0,02595}{1 - e^{\frac{13,69(T - 372,1)}{T}}} \right]$$

#### 4.8 - Balanço de energia

Da equação 1 temos:

$$\bar{h} \cdot A \cdot (T_G - T_E) = \dot{m}_a h_{ev} + \rho \cdot C \cdot V \frac{d T_E}{dt}$$

onde:

$$\bar{h} = 98,275 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$$

$$A = 7,854 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$T_G = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_{LV} = 560,5 \text{ kcal/kg}$$

$$\rho = 2000 \text{ kg/m}^3 = \text{densidade da mica}$$

$$C = 0,21 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C} - \text{ calor específico da mica}$$

$$V = 6,545 \times 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$\dot{m}_a = \text{equação 8.}$$

logo, substituindo os valores acima na equação 1 teremos:

$$\frac{d T_E}{dt} = 0,078(100 - T_E) - 0,66 \left[ \frac{e^{\frac{13,69(T - 372,1)}{T}} - 0,02595}{1 - e^{\frac{13,69(T - 372,1)}{T}}} \right] \quad (9)$$

Condição inicial: para  $t = 0 \rightarrow T_E = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$

#### 4.9 - Escolha do $\Delta T$ adequado

Não levando em consideração o termo referente ao fluxo de massa na equação 9, a temperatura da esfera,  $T_E$ , irá atingir mais rapidamente a temperatura final de equilíbrio.

logo,

$$\frac{d T_E}{dt} = 0,078 (100 - T_E) \quad (10)$$

$$\frac{d T_E}{100 - T_E} = 0,078 dt$$

integrando fazendo:  $100 - T_E = T$

$$dT_E = -dt$$

teremos:

$$\int_{T_0}^T \frac{-dT}{T} = \int_0^t 0,078 dt$$

$$-\ln \frac{T}{T_0} = 0,078 t$$

$$-\ln \frac{100 - T_E}{100 - 30} = e^{-0,078 t}$$

$$T_E = 100 - 70 e^{-0,078 t} \quad (11)$$

Para  $T_E = 30^\circ C$  na equação 10 teremos:

$$\frac{d T_E}{dt} = 5,448.$$

$$\frac{d T_E}{dt} = \frac{T_E - 30}{\Delta t} = 5,448 \quad (12)$$

Para  $\Delta t = 1$  seg na eq. (12) -  $T_E = 35,448^\circ C$  erro = 0,6%  
 Para  $t = 1$  seg na eq. (11) -  $T_E = 35,252^\circ C$   
 Para  $\Delta t = 0,5$  seg na eq.(12) -  $T_E = 32,724^\circ C$  erro = 0,1%  
 Para  $\Delta t = 0,5$  seg na eq.(11) -  $T_E = 32,677^\circ C$

Conclusão: Para a resolução do nosso modelo iremos adotar um intervalo de tempo  $\Delta t$  de 0,5 segundo, a fim de que os valores obtidos na equação 9 nos dêem uma boa aproximação para a variação de temperatura da esfera ao longo de tempo.

4.10 - Cálculo da massa total de água que se deseja evaporar por grão:

Supondo todos os grãos com a mesma quantidade inicial de água, aproximadamente 53% b.u., e a mesma quantidade final, 5% b.u. teremos:

$$\text{Diâmetro da esfera} = 5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\text{Volume} = 6,545 \times 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$\text{Densidade da mica} = \rho = 2000 \text{ kg/m}^3$$

- Massa de mica seca =  $\rho \cdot V. = 1,309 \times 10^{-4} \text{ kg}$
- Massa final após a secagem:  $1,309 \times 10^{-4} \times 1,05$
- Massa inicial:  $1,309 \times 10^{-4} \times 1,53$
- Massa de água que deve evaporar:  $1,309 \times 10^{-4} \times (1,53-1,05) = 1,309 \times 10^{-4} \times 0,48 = 6,283 \times 10^{-5} \text{ kg} = 6,283 \times 10^{-2} \text{ g.}$

4.11 - Cálculo da variação da temperatura da esfera em função do tempo.

Para efetuarmos esse cálculo, usaremos o método de Euler, que é um método bem simples e de fácil manuseio.

$$\therefore Y_{i+1} = Y_i + h f(y_i) \quad \text{Equação geral}$$

onde:  $Y_{i+1} = T_{i+1}$

$$Y_i = T_i$$

$$h = \Delta t = 0,5 \text{ seg.}$$

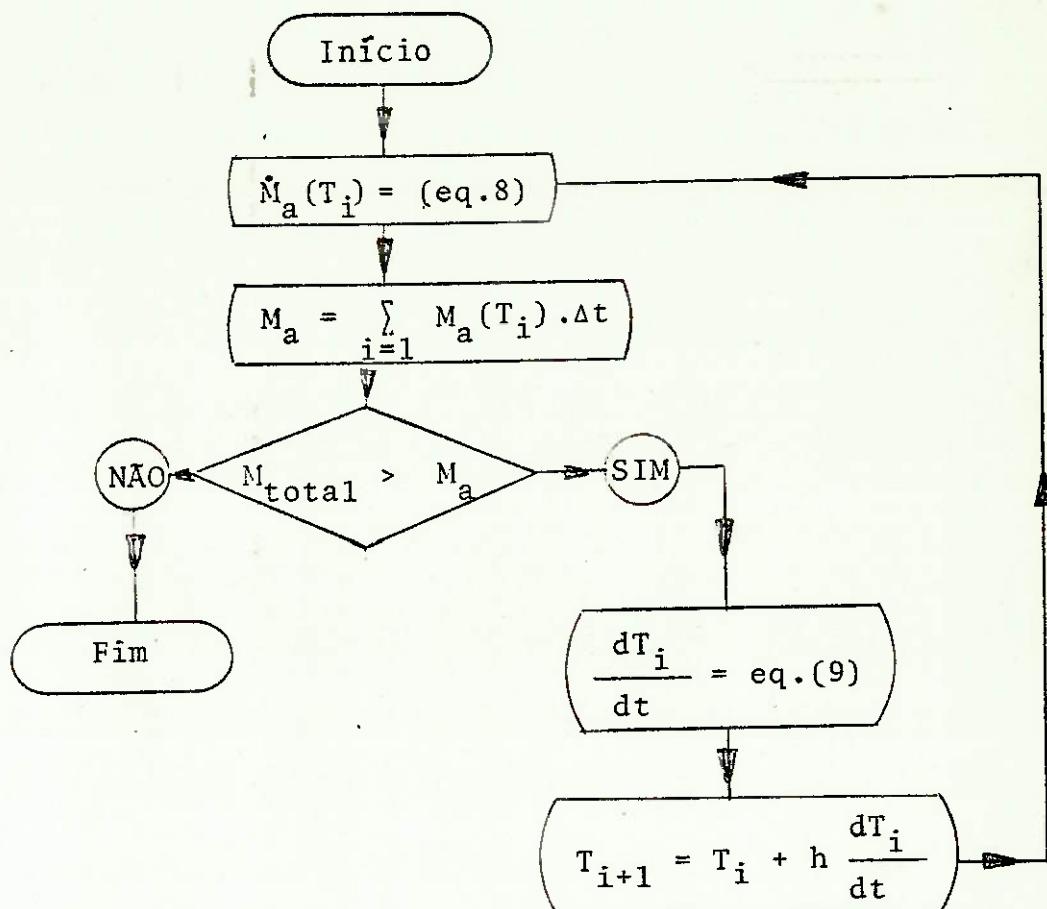
$$f(Y_i) = \frac{dT_i}{dt} \quad (\text{eq.(9)})$$

Condição inicial: p/  $t = 0$  seg  $\rightarrow T = 30^{\circ}\text{C}$

Logo teremos o seguinte algoritmo :

$$T_{i+1} = T_i + \Delta t \frac{dT_i}{dt} = T_i + \frac{1}{2} \frac{dT_i}{dt}$$

$$T_{i+1} = T_i + \frac{1}{2} \frac{dT_i}{dt}$$

4.12- Fluxograma do cálculo de secagem

4.13 - Programa de cálculo para o fluxograma

Este programa pode ser usado em calculadoras HP.  
(25, 29, 33,34).

1 - LBL 1	32 - LBL 2
2 - RCL 1	33 - RCL 5
3 - RCL 2	34 - RCL 6
4 - +	35 - -
5 - STO.5	36 - 1
6 - RCL 3	37 - ENTER
7 - -	38 - RCL 5
8 - RCL.5	39 - -
9 - ÷	40 - ÷
10 - RCL 4	41 - RCL.2
11 - x	42 - x
12 - e <sup>x</sup>	43 - CHS
13 - STO 5	44 - 1
14 - RCL 6	45 - 0
15 - -	46 - 0
16 - 1	47 - ENTER
17 - ENTER	48 - RCL 1
18 - RCL 5	49 - -
19 - -	50 - RCL.3
20 - ÷	51 - x
21 - RCL 7	52 - +
22 - x	53 - R/S
23 - R/S	54 - .
24 - STO+8	55 - 5
25 - RCL 8	56 - x
26 - 2	57 - RCL 1
27 - ÷	58 - +
28 - RCL 9	59 - STO 1
29 - x > y	60 - R/S
30 - gTO 2	61 - GTO 1
31 - RTN	

- Memórias utilizadas e seus valores iniciais

1 -  $T_i \rightarrow 30$  (valor inicial)

2 - 273

3 - 372,1

4 - 13,69

5 - P

6 - 0,026

7 -  $5,85 \times 10^{-4}$

8 -  $M_a = 0$  (valor inicial)

9 -  $M_{total} = 6,28 \times 10^{-2}$  g

.2 - 0,66

.3 - 0,078

.4 =  $\frac{dT_i}{dt} \rightarrow 0$  (valor inicial)

.5 =  $T_i + 273$

- OBS. O R/S do passo 23 fornece o valor de  $M_a(T_i)$

O R/S do passo 53 fornece o valor de  $dT_i/dt$

O R/S do passo 60 fornece o valor de  $T_{i+1}$

4.14 - Cálculos efetuados

$T_i$ (°C)	$M_a(T_i)$ (g/s)	$d T_i / dt$
30	$1,11 \times 10^{-5}$	5,45
32,72	1,55 "	5,23
35,34	2,05 "	5,02
37,85	2,60 "	4,82
40,26	3,18 "	4,62
42,57	3,85 "	4,44
44,79	4,55 "	4,26
46,92	5,32 "	4,08
48,96	6,14 "	3,91
50,91	7,03 "	3,75
52,79	7,97 "	3,59
54,58	8,98 "	3,44
56,30	$1,00 \times 10^{-4}$	3,29
57,95	1,12 "	3,15
59,53	1,24 "	3,02
61,04	1,36 "	2,89
62,48	1,50 "	2,76
63,86	1,64 "	2,63
65,18	1,78 "	2,52
66,43	1,93 "	2,40
67,63	2,09 "	2,29
68,78	2,25 "	2,18
69,87	2,42 "	2,08
70,91	2,60 "	1,98
71,89	2,78 "	1,88
72,83	2,96 "	1,78

$T_i$	$M_a(T_i)$	$d T_i / dt$
73,73	$3,15 \times 10^{-4}$	1,69
74,57	3,35 "	1,61
75,38	3,35 "	1,52
76,14	3,75 "	1,44
76,86	3,95 "	1,36
77,54	4,16 "	1,28
78,18	4,37 "	1,21
78,78	4,58 "	1,14
79,35	4,79 "	1,07
79,89	4,99 "	1,01
80,39	$5,20 \times 10^{-4}$	0,94
80,86	5,41 "	0,88
81,30	5,61 "	0,83
81,71	5,81 "	0,77
82,10	6,00 "	0,72
82,46	$6,19 \times 10^{-4}$	0,67
82,79	6,38 "	0,62
83,11	6,56 "	0,58
83,39	6,73 "	0,54
83,66	6,89 "	0,50
83,91	$7,05 \times 10^{-4}$	0,46
84,14	7,21 "	0,42
84,35	7,35 "	0,39
84,55	7,62 "	0,33

$T_i$	$M_a(T_i)$	$dT_i/dt$	$T_i$	$M_a(T_i)$	$dT_i/dt$
84,89	$7,74 \times 10^{-4}$	0,30	86,54	$9,14 \times 10^{-4}$	0,018
85,05	7,86 "	0,28	86,55	9,15 "	0,016
85,18	7,97 "	0,26	86,56	9,16 "	0,015
85,31	8,07 "	0,24	86,57	9,17 "	0,014
85,43	8,16 "	0,22	86,58	9,18 "	0,012
85,54	$8,25 \times 10^{-4}$	0,20	86,59	$9,18 \times 10^{-4}$	0,011
85,64	8,33 "	0,18	86,59	9,19 "	0,010
85,73	8,41 "	0,16	86,60	9,19 "	0,0090
85,61	8,48 "	0,15	86,60	9,19 "	0,0088
85,89	8,54 "	0,14			
85,96	$8,60 \times 10^{-4}$	0,13			
86,02	8,66 "	0,11			
86,07	8,71 "	0,10			
86,13	8,75 "	0,09			
86,17	8,80 "	0,09			
86,22	$8,84 \times 10^{-4}$	0,08			
86,26	8,87 "	0,07			
86,28	8,90 "	0,06			
86,32	8,93 "	0,06			
86,35	8,96 "	0,05			
86,38	$8,99 \times 10^{-4}$	0,048			
86,40	9,01 "	0,044			
86,43	9,03 "	0,040			
86,45	9,05 "	0,036			
86,46	9,07 "	0,033			
86,48	$9,08 \times 10^{-4}$	0,030			
86,50	9,10 "	0,027			
86,51	9,11 "	0,024			
86,52	9,12 "	0,022			
86,53	9,13 "	0,020			

Podemos considerar que a partir desse instante a temperatura da esfera é igual a 86,60 °C, sendo que, o fluxo de massa a essa temperatura é igual a  $9,19 \times 10^{-4}$  g/s.

Até agora transcorreram: 44,5 seg

Massa retirada até esse momento:

$$M_a = \sum M_a(T_i) = 0,05225 \text{ g}$$

Massa total a retirar

$$M_{\text{total}} = 0,06283 \text{ g}$$

Massa que falta retirar:

$$\Delta M = M_{\text{total}} - M_a = 0,01058 \text{ g}$$

Tempo necessário para retirada do  $\Delta M$ :

$$\text{tempo} = \frac{\Delta M}{M_a(86,60)} = \frac{0,01058}{9,18 \times 10^{-4}}$$

$$\text{tempo} = 11,5 \text{ seg.}$$

tempo total do processo de secagem:

$$t_{\text{total}} = 44,5 + 11,5 = 56 \text{ seg.}$$

$$t_{\text{total}} = 56 \text{ seg.}$$

#### 4.15 - Cálculo do comprimento do secador

Para o cálculo a seguir iremos adotar os seguintes valores:

- Material na saída do secador = 500 kg/h com 5% b.u.
- Massa de ar =  $31808 \text{ m}^3/\text{h} = 28.000 \text{ kg/h}$
- Temperatura inicial da mica = 30 °C

- Temperatura do ar na entrada = 100 °C
- Calor específico do ar = 0,24 kcal/kg °C
- $h_{ev} = 560,5 \text{ kcal/kg}$
- $d m_a = 0,0015 \text{ kg/s}$
- diâmetro do secador = 1,5 m
- coeficiente de vazio,  $\alpha = 0,3$
- coeficiente de película = 98,275 kcal/h m<sup>2</sup> °C

#### 4.15.1- Cálculo da temperatura de saída de ar

- Ar como volume de controle:

$$dq = m_A c_A dT_A = h dA(T_A - T_E) \quad \text{eq.(1)}$$

sendo:  $dA = \frac{\alpha \cdot A_t \cdot d_z}{V_{esfera}} \cdot A_{esfera}$

- Mica como volume de controle:

$$dq = m_E c_E dT_E + d m_A h_{LV} = h dA(T_A - T_E) \quad \text{eq.(2)}$$

- Considerando que os calores específicos não variam com a temperatura, iremos escrever um balanço térmico da entrada até uma seção reta arbitrária do secador, logo:

$$m_a \cdot c_a (T_A - T_{A_E}) = m_E \cdot c_E (T_E - T_{E_E}) + d m_A \cdot h_{LV}$$

Isolando o termo " $T_E$ ":

$$-T_E = \frac{m_a c_a}{m_E c_E} (T_A - T_{A_E}) + \frac{1}{m_E c_E} d m_A \cdot h_{LV} - T_{E_E}$$

$$T_A - T_E = T_A \left(1 + \frac{m_a c_a}{m_E c_E}\right) - \frac{m_a c_a}{m_E c_E} T_{A_E} + \frac{1}{m_E c_E} d m_A \cdot h_{LV} - T_{E_E}$$

eq.(3)

Substituindo a equação acima na equação 1:

$$-\frac{m_a c_a d}{3} T_A = h \frac{A_t dz}{\frac{4}{3} \pi r^3} \cdot 4 \pi r^2 \left[ T_A \left( 1 + \frac{m_a c_a}{m_E c_E} \right) - \frac{m_a c_a}{m_E c_E} T_{A_E} + \frac{1}{m_E c_E} \cdot d m_A h_{LV} - T_{E_E} \right]$$

$$\frac{d T_A}{T_A \left( 1 + \frac{m_a c_a}{m_E c_E} \right) - \frac{m_a c_a}{m_E c_E} T_{A_E} + \frac{1}{m_E c_E} \cdot d m_A h_{LV} - T_{E_E}} = \frac{-3 h \alpha A_t}{m_A c_A r} dz$$

Integrando entre 0 e Z teremos:

$$\ln \frac{T_{A_S} \left( 1 + \frac{m_a c_a}{m_E c_E} \right) - \frac{m_a c_a}{m_E c_E} T_{A_E} + \frac{1}{m_E c_E} d m_A h_{LV} - T_{E_E}}{T_{A_E} \left( 1 + \frac{m_a c_a}{m_E c_E} \right) - \frac{m_a c_a}{m_E c_E} T_{A_E} + \frac{1}{m_E c_E} d m_A h_{LV} - T_{E_E}} = - \frac{3 h \alpha A_t Z}{m_a c_a r}$$

$$\frac{m_a c_a}{m_E c_E} = \frac{28000 \times 0,24}{475 \times 0,21} = 67,60$$

$$m_E c_E = 475 \times 0,24 = 99,75$$

Logo:

$$\ln \frac{T_{AS} (1+6760) - 67,60 \times 100 + \frac{0,0015 \times 560,5 \times 3600}{99,75} - 30}{100(1+67,60) - 67,60 \times 100 + \frac{0,0015 \times 560,5 \times 3600}{99,75} - 30} =$$

$$= - \frac{3 \times 98,275 \times 0,3 \times 1,77 \cdot Z}{28000 \times 0,24 \times 0,75}$$

$$\ln \frac{68,60 T_{AS} - 6760 + 30,34 - 30}{6860 - 6760 + 30,34 - 30} = - 0,03 Z$$

$$\ln \frac{68,60 T_{AS} - 6760,34}{100,34} = - 0,03 Z$$

$$\frac{68,60 T_{AS} - 6760,34}{100,34} = e^{-0,03 Z}$$

$$T_{AS} = \frac{100,34 e^{-0,03 Z} + 6760,34}{68,60} \quad \text{eq.4}$$

#### 4.15.2 - Quantidade de água a retirar

- Condição do material na saída:

500 kg/h com 5% b.u.

- Qualidade de material seco: 475 kg/h

- Condição do material na entrada: 53% em b.u.

$$m_{\text{entrada}} = 1010 \text{ kg/h}$$

- Qualidade de água a retirar:

$$m_{\text{água}} = 1010 - 500 = 510 \text{ kg/h.}$$

#### 4.15.3 - Condição do ar na entrada e na saída

Na entrada :  $T = 100^{\circ}\text{C} = 373^{\circ}\text{K}$

Pressão parcial do vapor =  $0,02595 \text{ kgf/cm}^2$

Para um volume de  $1 \text{ m}^3$  :

$$m_{\text{água}} = \frac{0,02595 \times 10^4}{47,6 \times 373}$$

$$m_{\text{água}} = 1,40 \times 10^{-2} \text{ kg.}$$

Na saída, o ar apresenta um acréscimo da quantidade de água em cerca de :

$$\Delta m_{\text{água}} = \frac{510}{31808} = 1,60 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$$

A quantidade de água existente no ar na saída é de:

$$m_{\text{água}} = 1,40 \times 10^{-2} + 1,60 \times 10^{-2} = 3 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$$

#### 4.15.4- Roteiro de cálculo do comprimento do secador

- Adota-se um comprimento  $Z$  para o secador e obtém-se a temperatura de saída do ar com o auxílio da eq.4.

- Com essa temperatura, calculamos a pressão parcial do ar e a seguir a pressão parcial do vapor d'água.

- Com essa pressão parcial do vapor d'água calculase a massa de vapor existente na mistura ar-vapor.

- Comparamos o valor da massa de vapor d'água existente com a que é necessária retirar; se for menor, repetimos a sequência com um comprimento maior; se for maior, repetimos a sequência com um comprimento menor.

Todos os valores obtidos com relação às quantidades de massa são feitas para um volume de 1 m<sup>3</sup>.

#### 4.15.4.1 - Cálculos efetuados

- massa de ar na entrada do secador:

$$m_{ar} = \frac{P_a V}{R_a T} = \frac{(1 - 0,02595) \times 10^4}{29,6 \times 373}$$

$$m_{ar} = 0,86 \text{ kg/m}^3$$

- Temperatura de saída do ar para um comprimento de 10 m.

Da eq. 4 :

$$T_A = 99,3^\circ\text{C}$$

- Pressão parcial do ar:

$$P_a = \frac{0,86 \times 29,6 \times (99,3 + 273)}{10^4}$$

$$P_a = 0,9478 \text{ kgf/cm}^2$$

- Pressão parcial do vapor d'água:

$$P_v = 1 - 0,9478$$

$$P_v = 0,0522 \text{ kgf/cm}^2$$

- Massa de água:

$$m_v = \frac{0,0522 \times 10^4}{47,6(99,3 + 273)}$$

$$m_v = 0,0295 \text{ kg/m}^3.$$

Comparando os dois valores,

$$m_{\text{vapor obtido}} = 0,0295 \text{ kg/m}^3$$

$$m_{\text{vapor necessário}} = 0,03 \text{ kg/m}^3.$$

Notamos que eles são bem próximos, com uma diferença de 1,86%. Devido a essa pequena diferença, iremos adotar um comprimento de cerca de 11m para o nosso secador.

BIBLIOGRAFIA

1. A.B.ZLOBIK; "Mineral Facts and Problems", U.S. Dept. of Interior, Bureau of Mines, Washington D.C., 1981
2. MANGANARO, JAMES L., "Heat and Mass Transfer in Particle Dehydration", American Chemical Society, 1980.
3. DUBBEL, Manual de Construção de Máquinas.
4. REMY BENEDITO SILVA,"Manual de Termodinâmica e Transmissão de Calor.
5. BIRD, STEWART & LIGHTFOOT; Transport Phenomena.
6. BENNETT & MYERS; Momentum, Heat and Mass Transfer.
7. KREITH,FRANK; Princípios da Transmissão de Calor.
8. VAN WYLEN, GORDON J.; "Fundamentos da Termodinâmica Clássica.
- 9 PERRY,JOHN H.; Chemical Engineer's Handbook.
10. EDWARDS, DENNY and MILLS; Transfer Process.
11. A. I. Ch. E. Journal.