



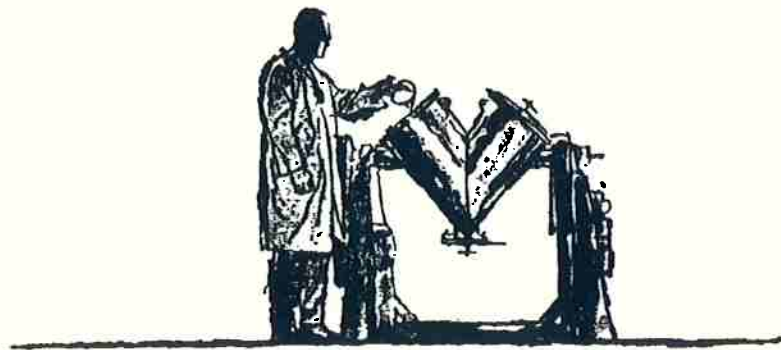
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

ESTUDO DO PROCESSO DE MISTURA DE PÓS NA INDÚSTRIA METALÚRGICA DE SINTERIZADOS

TRABALHO DE FORMATURA

Engenheirando: Michel Ben Horovitz

Orientador: Prof. Dr. André Paulo Tschiptschin



São Paulo, Dezembro de 1995

ÍNDICE

1) INTRODUÇÃO TEÓRICA.	pag 3.
1.2) MECANISMOS DE MISTURA.	pag 3.
1.3) HOMOGENEIZAÇÃO X SEGREGAÇÃO.	pag 4.
1.4) CLASSIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE MISTURA.	pag 8.
1.5) VARIÁVEIS DO PROCESSO DE MISTURAÇÃO E SUA INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES DA MISTURA.	pag 10.
2) EXPERIMENTAL .	pag 15.
3) RESULTADOS E DISCUSSÃO.	pag 17.
4) CONCLUSÕES.	pag 22.
5) BIBLIOGRAFIA.	pag 23.

HISTÓRICO:

Em uma Indústria Metalúrgica de Sinterizados a primeira etapa do processo de fabricação das peças sinterizadas muitas vezes é o processo de mistura dos pós, já que muitas empresas não produzem os pós utilizados como matéria prima para a produção das peças.

No processo de mistura são preparadas todas as ligas necessárias para a produção. A etapa seguinte ao processo de mistura é a compactação dos pós da mistura na forma final das peças. Após esta etapa as peças compactadas passam pelos fornos de sinterização onde se atinge uma resistência mecânica considerável. Etapas seguintes como tratamento térmico de endurecimento, recompressão e usinagem são geralmente necessárias.

Muitas vezes verifica-se antes ou depois da etapa de sinterização variações dimensionais, de dureza ou de peso nas peças. Este problema pode ter a sua causa na etapa de mistura, compactação ou sinterização.

O presente trabalho foi realizado na indústria BRASSINTER onde a etapa de mistura foi considerada como principal responsável pela variação de propriedades das peças. Isto porque variava muito a densidade aparente de uma mesma mistura preparada em tempos diferentes.

Logo, surgiu a necessidade da realização de um estudo que identificasse as possíveis causas destas variações e sugerisse uma forma de se controlar tal fato.

Este trabalho realizado com a orientação do Eng^o Fernando Araújo foi realizado durante o ano de 1995 na fábrica de peças sinterizadas da BRASSINTER e teve como objetivo atender as necessidades citadas.

1. INTRODUÇÃO TEÓRICA.

A mistura de diferentes tipos de pós é um processo largamente utilizado na indústria de cerâmicos, plásticos, fertilizantes, vidros, remédios e sinterizados (1).

Na indústria metalúrgica, mais precisamente em uma fábrica de peças sinterizadas, o processo de mistura é o meio utilizado para a elaboração das ligas empregadas na produção das peças sinterizadas. Durante a etapa de mistura, misturam-se não apenas os elementos da liga desejada mas também cerca de 0,5 a 1,0% de lubrificante para que durante a etapa de compactação das peças o atrito entre as paredes da matriz e as partículas de pó seja o menor possível (2).

A lubrificação quando feita através da adição de lubrificantes durante a etapa de mistura reduz também o atrito entre as partículas de pó a serem compactadas. Os lubrificantes mais utilizados na indústria de metalurgia do pó são a cêra e o estearato de zinco.

Durante a etapa de mistura objetiva-se o maior grau possível de homogeneização entre os constituintes da mistura. Entretanto, devido a diferenças quanto ao tamanho, forma, e natureza da superfície das partículas de pó é muito difícil de se obter uma mistura totalmente homogênea.

1.2 Mecanismos de Mistura.

A mistura das partículas de pó acontece através de três principais mecanismos (1):

- *mistura por convecção*: Este tipo de homogeneização é caracterizado pelo movimento de grupos de partículas dentro da mistura. Os componentes da mistura são divididos em grupos. Estes grupos são dispersos e seu tamanho é progressivamente reduzido.
- *mistura por difusão*: A homogeneização se dá pelo movimento individual das partículas o que garante uma mistura de alta qualidade.
- *mistura por cisalhamento*: O processo de mistura ocorre pelo escorregamento de camadas de partículas dentro do volume misturado. Este mecanismo é considerado como sendo uma combinação entre os dois primeiros mecanismos.

Existem vários tipos de misturadores sendo que cada misturador possui um mecanismo de mistura que é predominante. Entretanto, todos os mecanismos de mistura ocorrem simultaneamente variando apenas a intensidade de cada mecanismo. Dois mecanismos que ocorrem simultaneamente durante a mistura são ilustrados na figura 1.

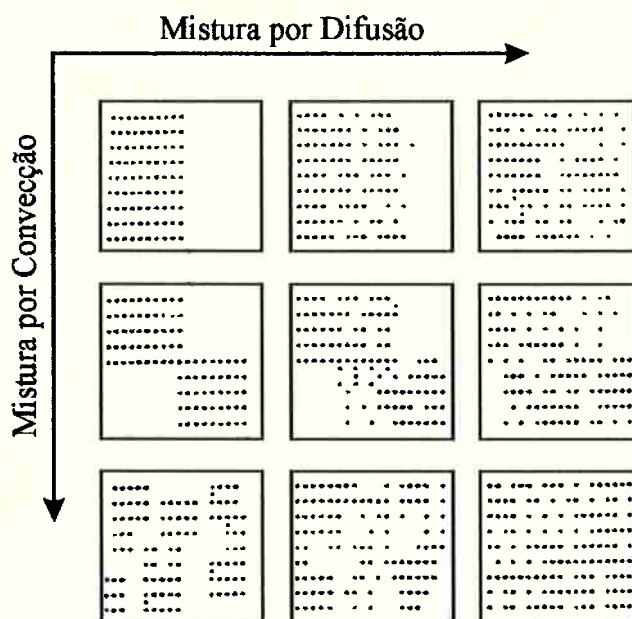


figura 1: Representação esquemática dos mecanismos de mistura.

A convecção das partículas pode ser comparada ao movimento em líquidos turbulentos enquanto que a difusão das partículas de pó é análoga a difusão molecular. Estas analogias são feitas apenas em escala macroscópica já que existem diferenças entre a misturação de sólidos (pós) e líquidos. Dentre elas podemos destacar que o mecanismo de difusão para gases, líquidos e pós não é o mesmo já que no caso dos pós não ocorre um movimento relativo entre as partículas sem que uma energia externa seja fornecida para a mistura. Outro ponto importante a ser comentado é o fato de que na misturação de pós o menor elemento é uma partícula enquanto que nos líquidos moléculas é que se misturam. Logo, no caso dos líquidos por pior que seja a qualidade da mistura ela será superior a uma mistura de partículas de pó.

1.3 Homogeneização x Segregação.

Uma mistura pode ser definida como homogênea quando todas as amostras da mistura possuírem as mesmas propriedades e composição química. O processo de homogeneização de uma mistura sempre ocorre em competição com o fenômeno de segregação ou desmisturação que acaba evitando uma perfeita homogeneização. O estado

final obtido após a mistura dos componentes é um equilíbrio que pode ser visualizado como um processo reversível (1):

$$\text{segregação} = \text{homogeneização da mistura}$$

A qualidade da mistura dentro de um misturador depende diretamente deste equilíbrio dinâmico. As causas da segregação são numerosas e são dependentes da natureza dos componentes da mistura. A desmisturação pode ocorrer pela separação dos componentes da mistura devido a diferenças no tamanho, forma e densidade das partículas ou pela aglomeração das partículas devido a presença de umidade e cargas eletrostáticas (1,3).

A quantificação da qualidade da mistura (M) é feita utilizando-se a variância da composição química entre as amostras da mistura final S^2 , da mistura no seu estado inicial So^2 (totalmente segregada) e de uma mistura hipotética totalmente homogênea de variância Sh^2 :

$$M = (So^2 - S^2) / (So^2 - Sh^2) \quad [1]$$

onde o índice da qualidade da mistura M varia entre 0 e 1 sendo 1 o valor correspondente a uma mistura totalmente homogênea. Admitindo-se que para uma mistura homogênea $Sh^2=0$ e que para uma mistura no seu estado inicial $So^2 = Xp(1-Xp)$ onde Xp é a concentração do principal componente da mistura temos que :

$$M = 1 - S^2/So^2 \quad [2] \quad \text{para o caso geral.}$$

A precisão do resultado varia com a raiz quadrada do número de amostras retiradas para o cálculo de M (9).

Na indústria de metalurgia do pó a segregação dos componentes da mistura ocorre principalmente devido a diferenças de tamanho e densidade dos elementos da mistura. As partículas maiores e mais densas tendem a se depositar no fundo do misturador enquanto que as partículas leves tendem a segregar para a superfície formando uma poeira leve que fica em suspensão no ar. Este fenômeno ocorre com as partículas de grafita quando

misturadas com pó de ferro, cobre e outros elementos já que a grafita possui uma baixíssima densidade quando comparada as partículas de ferro e cobre. A este fenômeno dá-se o nome de “dusting”.

A segregação em uma indústria de metalurgia do pó tem início no processo de mistura e só termina quando o pó é compactado na forma de peças a serem sinterizadas. A figura 2 é uma ilustração esquemática da segregação e “dusting” de partículas que ocorre durante o descarregamento do misturador e a segregação adicional que ocorre durante o armazenamento e a compactação das peças (4).

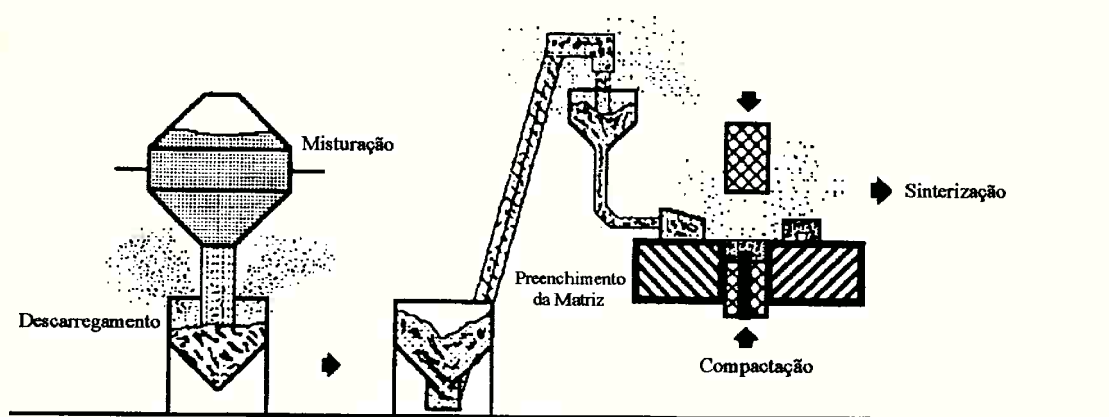


figura 2: segregação na indústria de metalurgia do pó.

Métodos para reduzir a suscetibilidade a segregação das misturas como pré-ligar e pré-difundir (processo DISTALOY®) os pós tem sido utilizados durante muitos anos. A figura 3 compara estes dois métodos com o processo tradicional de mistura. Nos pós pré-ligados os principais elementos da liga estão homogeneamente distribuídos dentro de cada partícula. Este método reduz a compressibilidade dos pós principalmente devido a adição de carbono, na forma de grafita, um elemento endurecedor das ligas a base de ferro. Logo, a obtenção de peças de alta densidade fica extremamente dificultada limitando assim a produção de peças de alta performance por métodos convencionais.

Já no processo DISTALOY® os elementos de liga são pré-difundidos nas partículas de ferro reduzindo assim a segregação na mistura sem afetar a compressibilidade da mesma (figura 3c). Todavia, elementos endurecedores como o carbono (adicionado na forma de grafita) não podem também ser pré-difundido já que o carbono mesmo difundido superficialmente nas partículas de ferro diminui a compressibilidade da mistura.

Consequentemente, variações devido a segregação de aditivos finos, como a grafita, continuou a ser um problema para a indústria de metalurgia do pó.

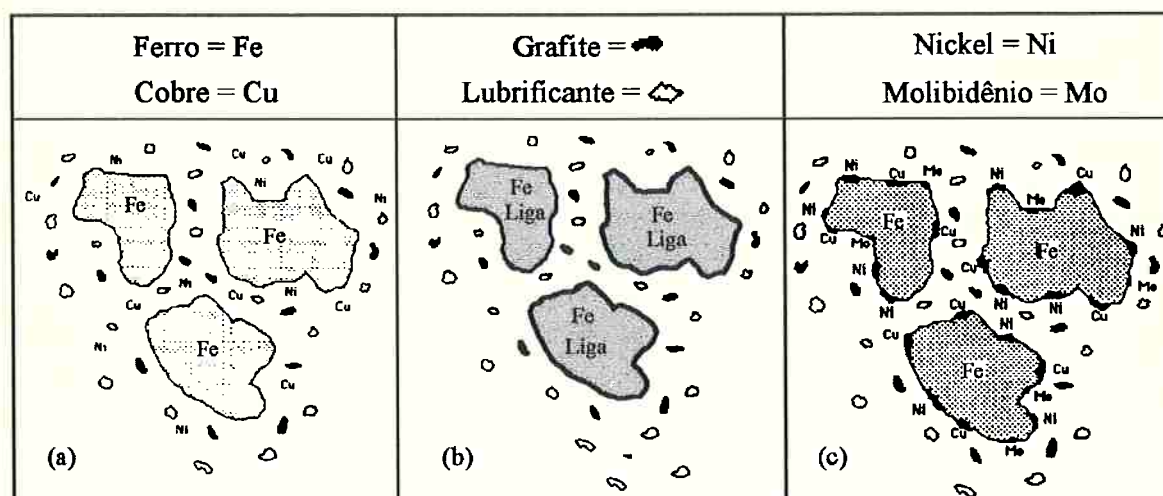


figura 3: comparação entre os métodos de mistura: (a) mistura tradicional, (b) mistura de pré-ligados e (c) mistura de pré-difundidos.

Este problema parece ter sido solucionado com o processo de mistura denominado ANCORBOND[®] no qual as partículas de níquel, cobre e inclusive grafita são aglomeradas as partículas de ferro por meio de um aglomerante especial. A figura abaixo compara o processo de mistura ANCORBOND[®] com o processo de mistura tradicional (5).

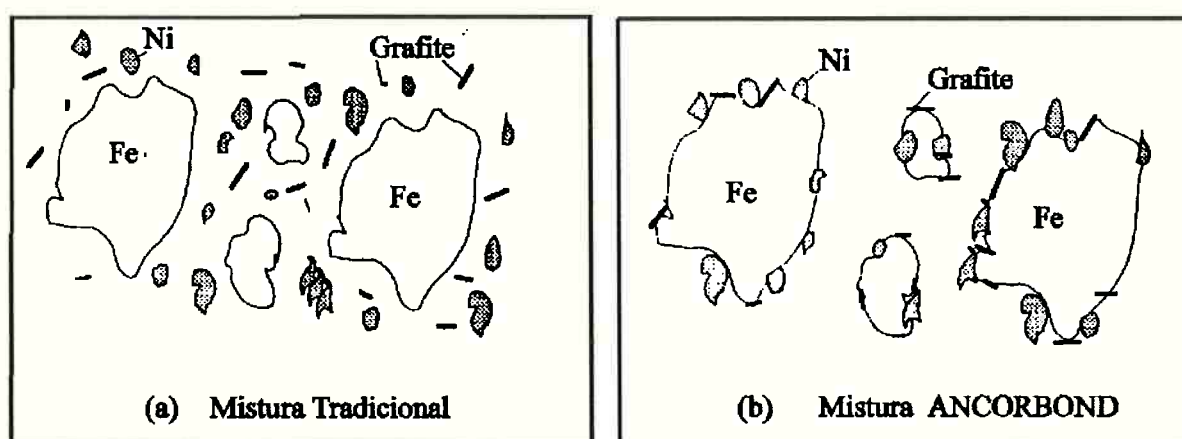


figura 4: comparação entre os processos ANCORBOND[®] e tradicional.

Podemos observar através da figura que as misturas obtidas pelo processo ANCORBOND[®] são homogêneas e livres de segregação.

1.4 Classificação do equipamento de mistura.

Os vários tipos de misturadores existentes são classificados de acordo com o mecanismo de mistura que prevalece em cada um deles. As quatro principais classes de misturadores são de queda, convectivos, de escoamento gravitacional e de leito fluidizado.

Misturadores de queda.

Um misturador de queda é formado por um recipiente que acoplado a um eixo gira em torno do mesmo fazendo com que as partículas dentro do misturador caiam umas sobre as outras na superfície de mistura. O recipiente do misturador pode ter forma de cubo, duplo cone, cilindro, V ou Y. Um misturador de queda em forma de V é apresentado na figura 5.

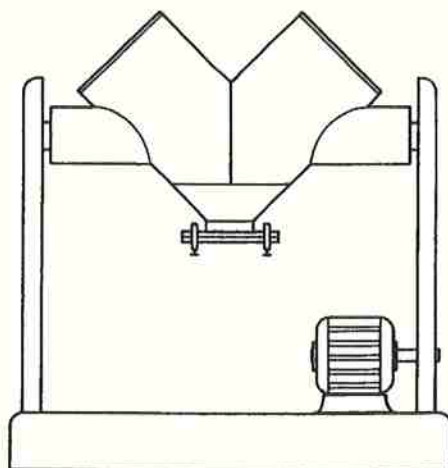


figura 5: Misturador de queda em forma de V.

Em um misturador de queda a mistura é relativamente rápida na direção radial enquanto que na direção axial ela é lenta e portanto controla o processo. Uma segregação apreciável pode ocorrer neste tipo de misturador. Com a instalação de um impulsor na parte interna do misturador reduz-se a segregação das partículas.

Misturadores convectivos.

Na maioria dos misturadores convectivos um impulsor ou rotor opera dentro de um recipiente estático fazendo com que grupos de partículas se movam de um lugar para outro dentro do volume de pó. O misturador de lâminas é provavelmente o misturador

convectivo mais utilizado. Neste misturador as lâminas se movem dentro do recipiente e as partículas de pó são relocadas pelo movimento de lâminas internas. A figura abaixo apresenta um misturador de lâminas.

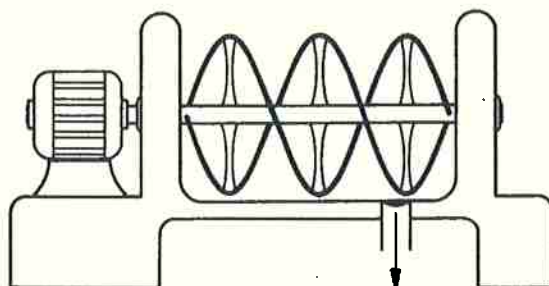


figura 6: Misturador de lâminas.

Neste tipo de misturador a segregação é menos intensa quando comparada aos misturadores nos quais predominam a mistura por difusão e cisalhamento.

Misturadores de escoamento por gravidade.

Em um misturador de escoamento por gravidade, as partículas escoam devido a ação da gravidade de modo que a mistura é totalmente induzida pelo escoamento gravitacional. Um ou mais cones “colhedores de pós” são geralmente instalados na parte central do misturador com o objetivo de se formar um gradiente de velocidade. Dependendo do grau de homogeneidade necessário as partículas podem ser recicladas para o misturador através de uma ação mecânica ou pneumática. Segregação muitas vezes é um problema comum que ocorre neste tipo de misturador (figura 7).

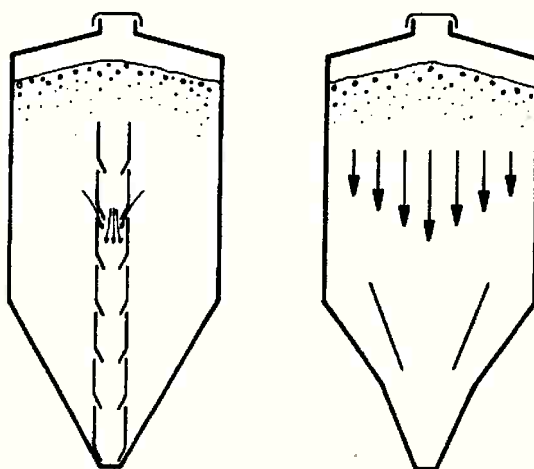


figura 7: Misturador de escoamento por gravidade.

Misturadores de leito fluidizado.

Já em um misturador de leito fluidizado, a mistura é feita tanto por convecção como pela ação da gravidade. Em um leito fluidizado o pó é submetido a um fluxo de gás que escoa no sentido contrário a força da gravidade. O peso das partículas é contrabalançado pela fluidez das mesmas. Logo, a mobilidade das partículas aumenta. Portanto, em casos que o fluxo de gás for suficientemente alto a turbulência dentro do leito será considerável e a combinação desta turbulência com a mobilidade das partículas produzirá excelentes misturas. A figura 8 ilustra um misturador de leito fluidizado.

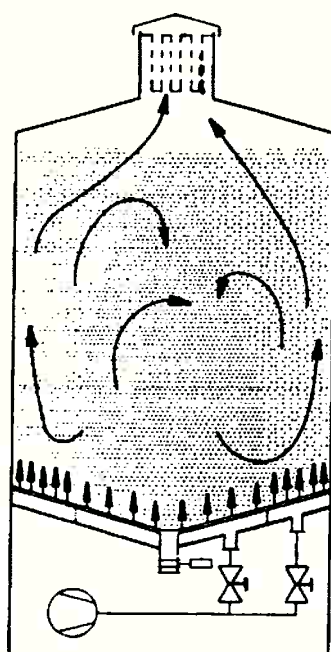


figura 8: misturador de leito fluidizado.

1.5 Variáveis do processo de misturação e sua influência nas propriedades da mistura.

A misturação de pós é um processo relativamente complicado pouco entendido que envolve um grande numero de variáveis. A tabela abaixo mostra as principais variáveis que influem no processo de mistura.

tabela 1: principais variáveis do processo de mistura.

PRINCIPAIS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE MISTURA			
1	Tipo do misturador	6	Velocidade de mistura
2	Volume do misturador	7	Temperatura de mistura
3	Área interna do misturador	8	Tempo de mistura
4	Relação Volume da mistura / Volume do misturador	9	Atmosfera de mistura
5	Características dos pós	10	Descarregamento da mistura

1.5.1 Tipo do Misturador.

Vimos anteriormente que existem uma série de tipos de misturadores que diferem principalmente quanto ao mecanismo de mistura. Assim, pode-se concluir que o tipo de misturador utilizado influenciará as propriedades finais da mistura. Mas, mesmo pertencendo a mesma classe os misturadores podem ter volume e área de superfície diferentes o que também resultara em misturas com propriedades diferentes (7).

Portanto, o uso de misturadores em escala laboratorial pode ser ineficaz quando deseja-se prever o comportamento das misturas em escala industrial. Isto é válido para misturadores de lâminas onde a relação pá impulsora / volume do misturador pode mudar radicalmente (3).

Já misturadores de queda do tipo duplo-cone parecem não seguir esta regra e são usados com sucesso em escala laboratorial tendo comportamento semelhante ao seu protótipo (3).

1.5.2 Tempo de mistura.

O tempo de mistura tem um forte efeito sobre as propriedades da mistura tais como homogeneidade densidade aparente e velocidade de escoamento. O tempo ideal de mistura depende do misturador e do pó a ser misturado. Para misturadores de queda do tipo duplo-cone tempos curtos de mistura entre 5 e 20 minutos são uma regra geral (3).

A medida que aumentamos o tempo de mistura aumentamos também a densidade aparente e a velocidade de escoamento das misturas (7,8,9). Este incremento na densidade e no escoamento da mistura é extremamente desejável já que muitas das matrizes de

compactação possuem um volume fixo (não regulável) e portanto quanto maior a densidade da mistura maior a densidade da peça compactada (9). Já um alto escoamento diminui tempos de produção e permite um melhor preenchimento dos detalhes da matriz (9).

Entretanto, devemos destacar também que a medida aumentando muito o tempo de mistura, aumentamos também a segregação dos componentes da mistura podendo até alterar a estrutura dos pós metálicos deixando-os mais duros e consequentemente mais difíceis de serem compactados (3,9). Logo, procurando-se evitar tais problemas costuma-se utilizar tempos não muito longos de mistura.

1.5.3 Velocidade de mistura.

Velocidade crescentes de mistura tem como consequência um aumento na densidade aparente e na velocidade de escoamento da mistura (3,9). Podemos dizer de forma aproximada que quanto maior a velocidade do misturador, menor é o tempo necessário para se obter uma mistura de qualidade satisfatória (7,9). Todavia, existe uma velocidade limite para todos os tipos de misturadores e pós sendo que acima desta velocidade a qualidade da mistura é sensivelmente afetada devido a principalmente dois fatores (3,7,9):

- intensa queda livre das partículas resultando em uma segregação das partículas mais pesadas e a formação de uma suspensão dos finos no ar.
- altas forças inerciais e de atrito que praticamente impedem com que as partículas se movam da parede do misturador.

A velocidade ideal de mistura é aquela na qual as forças inerciais são próximas a $\frac{3}{4}$ da força gravitacional (3,9). Em um misturador de queda de forma cilíndrica a força inercial que age sobre uma partícula de pó de massa m na parede do misturador é dada pela equação abaixo:

$$F_i = \frac{2mV^2}{d} \quad [3]$$

Sendo d o diâmetro rotacional do misturador e V a velocidade periférica na parede do misturador. Sabendo-se que $V = \pi dw$ e w é a velocidade rotacional do misturador, igualando a força inercial a $\frac{3}{4}$ da força gravitacional obtemos a velocidade ideal de mistura.

$$2m\pi^2\omega^2d = 0,75mg \quad [4]$$

Obtemos

$$w = \frac{32}{\sqrt{d}} \quad [5]$$

Logo, quanto maior o tamanho do misturador menores serão as velocidades necessárias para se obter uma mesma qualidade de mistura. No caso de misturadores do tipo duplo-cone o raciocínio descrito acima pode ser também aplicado já que a sua forma se assemelha a de uma esfera (3).

1.5.4 Relação Volume da mistura/Volume do misturador.

O volume de pó carregado no misturador é determinante na qualidade final da mistura (3,7,9). A literatura diverge quanto ao volume ideal a ser processado no misturador.

A medida que o misturador é carregado com pós, o movimento relativo das partículas é inibido. Para misturadores do tipo duplo-cone os fabricantes recomendam um carregamento de até 65% do volume do misturador (3). Entretanto, a menos que o material escoe facilmente deve-se procurar trabalhar com volumes de mistura inferiores a 50% do volume total já que devido a forma simétrica de um misturador duplo-cone qualquer carregamento que exceda 50% da capacidade do misturador não será totalmente deslocado durante uma rotação completa do misturador (3). Este fato poderá comprometer o resultado do processo de mistura.

1.5.5 Características dos pós.

Os pós a serem misturados podem ser diferentes em vários aspectos. A tabela abaixo mostra as mais importantes características e propriedades dos pós (7).

tabela 2: Principais características das partículas de pó.

Características das partículas de pó
1- Características do Material
Estrutura, Densidade Teórica, Ponto de Fusão
Densidade teórica, Plasticidade, Elasticidade e Impurezas
2- Características resultantes do processo de fabricação dos pós
Porosidade (densidade real), Tamanho da partícula, Forma da partícula
Área da partícula, Microestrutura e Camada Oxidada

No caso dos pós possuírem densidades muito diferentes a segregação dos mais pesados ocorrerá já que a força gravitacional é maior do que a força de atrito entre os pós (3,7). Partículas oxidadas na superfície escoam melhor e se misturam diferentemente do que partículas idênticas mas com superfície não oxidada. Estas diferenças no comportamento da mistura são devido a diferenças no coeficiente de atrito entre os pós (7).

Durante o processo de mistura ocorre o atrito entre as próprias partículas de pó e entre as partículas de pó e a parede do misturador. O atrito causa um aumento na temperatura. Dependendo da atmosfera de mistura e do incremento na temperatura as partículas de pó podem ser oxidadas superficialmente. O aumento da temperatura aumenta também o atrito entre as partículas e prejudica o escoamento das mesmas. Assim, conclui-se que um abaixamento na temperatura de mistura favorece o processo de mistura (7).

1.5.6 Atmosferas de mistura.

As misturas de pós podem ser feitas em ar ou em outras atmosferas. A seleção da atmosfera gasosa deve ser feita de forma cuidadosa já que o pó pode vir a reagir com a atmosfera alterando assim o coeficiente de atrito entre as partículas e consequentemente afetando a qualidade final da mistura (7).

O uso de misturadores a vácuo pode ser interessante já que além de evitar qualquer tipo de reação entre o meio e as partículas de pó diminui também o problema da segregação dos finos devido ao fato do empuxo ser igual a zero (3).

1.5.7 Descarregamento.

Esta é a última etapa do processo de mistura e muitas vezes pode afetar sensivelmente a qualidade da mistura obtida. Pode acontecer de a mistura estar homogênea em todos os seus pontos e durante o descarregamento ocorrer a segregação das partículas pesadas para o fundo e a formação de uma suspensão de finos no ar. Este fenômeno pode ser classificado como “desmisturação” resultante do descarregamento.

2. EXPERIMENTAL.

O primeiro passo na realização dos ensaios experimentais foi a determinação das dimensões do misturador tipo duplo-cone usado na preparação das misturas. A figura abaixo mostra um misturador duplo-cone semelhante ao misturador utilizado para os ensaios.

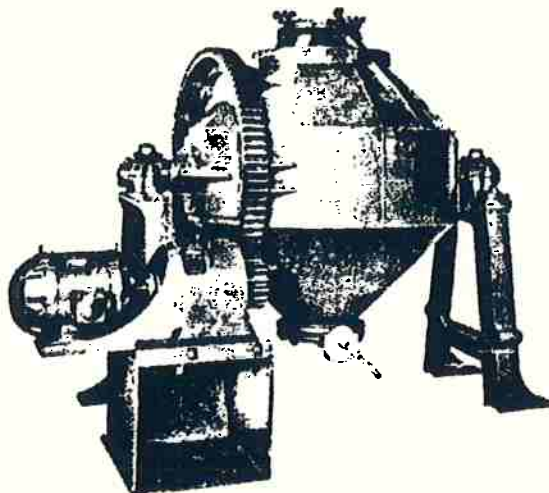


figura 9: Misturador do tipo duplo-cone.

O cálculo do volume foi feito com base nas dimensões externas do misturador e o valor encontrado foi de 14500cm^3 . Com este valor foi feito todo o cálculo de carga para os ensaios propostos.

A composição química da mistura estudada neste trabalho é apresentada na tabela abaixo.

tabela3: Composição química da mistura estudada.

Composição química	%Cu	%C	%MnS	% Estearato de Zinco	%Fe
da mistura	1,00	0,8	0,4	0,9	bal

Esta liga é muito usada na indústria de metalurgia do pó. O cobre é um elemento que é utilizado em muitas ligas de peças sinterizadas devido as múltiplas funções que ele exerce durante a sinterização. Além de ser um elemento endurecedor como o carbono, o cobre melhora o processo de sinterização das peças através da formação de uma fase líquida transiente (presente apenas no estágio inicial da sinterização) e através de uma expansão compensa a contração que é típica nas ligas Fe-C. Já o sulfeto de manganês melhora a usinabilidade enquanto que o Estearato de Zinco atua como lubrificante durante a compactação.

Todos os componentes desta liga foram adicionados na forma de pó sendo o pó de ferro do tipo ferro esponja com densidade aparente média de cerca de $2,5 \text{ g/cm}^3$ e o pó de cobre do tipo eletrolítico com densidade aparente média de cerca de $2,4 \text{ g/cm}^3$.

Após a escolha do misturador e da liga da mistura, teve início a fase de elaboração e caracterização das misturas. Foram preparadas uma série de misturas variando-se o tempo de mistura, a velocidade de mistura, a carga da mistura e o lote de pó de ferro.

O tempo de mistura variou entre 5 e 30 minutos, a velocidade do misturador entre 10 e 40 rpm e a relação volume da mistura entre 20 e 65% do volume total do misturador. Nas experiências em que se variou o tempo e a velocidade de mistura o volume da mistura foi mantido em 40% do volume do misturador. Já nos ensaios em que foram misturadas diferentes cargas a velocidade foi mantida em 20 rpm e o tempo de mistura em 15 minutos.

Preparadas, as misturas foram amostradas para que se determinasse a densidade aparente e a velocidade de escoamento das mesmas. A amostragem foi feita dentro do misturador para evitar o efeito da segregação resultante do descarregamento. Outro cuidado tomado foi o fato de as amostragens serem feitas 5 minutos após o misturador ser desligado garantindo assim um assentamento uniforme da mistura.

Para a determinação da densidade aparente e da velocidade de escoamento das misturas utilizou-se um funil do tipo hall de acordo com as normas ASTM B 213 e 212 respectivamente.

Um exame visual foi feito em todas as misturas com o objetivo de se medir qualitativamente a camada de grafita segregada que se observava na superfície da mistura.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

Durante a realização da parte experimental observou-se que a densidade aparente do pó de ferro a ser misturado tinha uma forte influência sobre o resultado final da mistura. Quanto mais denso fosse o pó de ferro mais denso era a mistura final. Este fato pode ser observado claramente na figura 10 onde é mostrada a curva densidade x tempo para três misturas diferentes quanto ao pó de ferro (numero do lote do fornecedor) mas semelhantes quanto a velocidade do misturador e volume misturado.

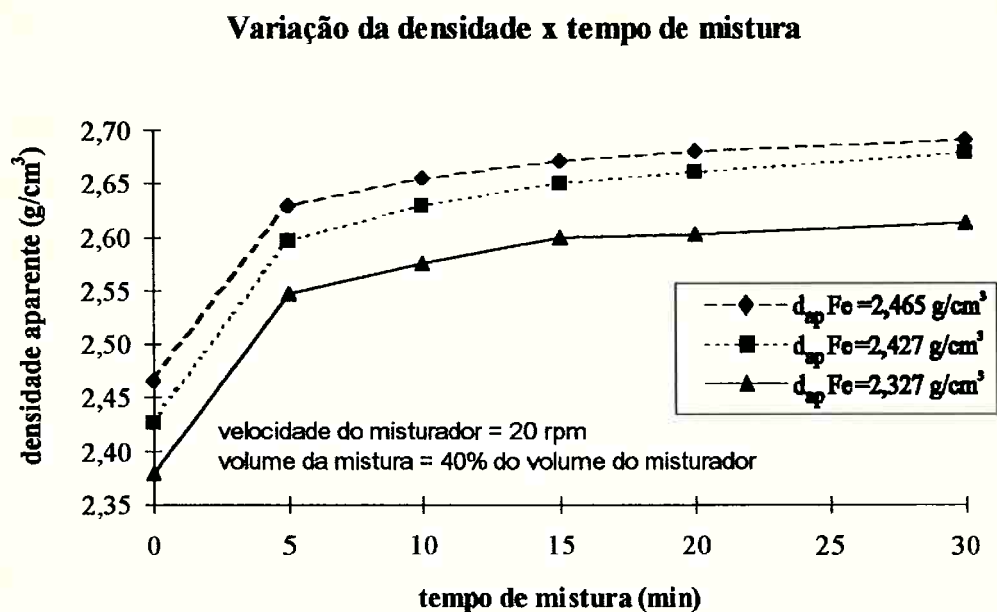


figura 10: Influência da densidade do pó de ferro na densidade aparente da mistura.

Nota-se que esta variação na densidade do pó de ferro se mantém para todos os tempos de mistura sem que haja uma intersecção das curvas. Esta variação é tão significativa que muitas vezes o efeito da densidade do pó de ferro na densidade da mistura sobrepõe o efeito das outras variáveis como tempo e velocidade de mistura. Isto, no início, acabou mascarando os resultados já que misturas elaboradas à 20 rpm se mostravam ora mais densas ora menos densas que misturas preparadas à 40 rpm. Devido a estas variações de resultados passou-se a medir a densidade do pó de ferro a ser misturado e estabelecer relações em porcentagem entre a densidade da mistura final e a densidade do pó de ferro inicial. A partir daí foi possível observar de forma mais clara e confiável a influência de variáveis como o tempo de mistura e a velocidade do misturador já que o uso destas relações anulou o efeito da densidade do pó de ferro misturado.

As figuras 11 e 12 mostram a influência do tempo e da velocidade de mistura na densidade aparente da mistura.

Variação da densidade x tempo de mistura

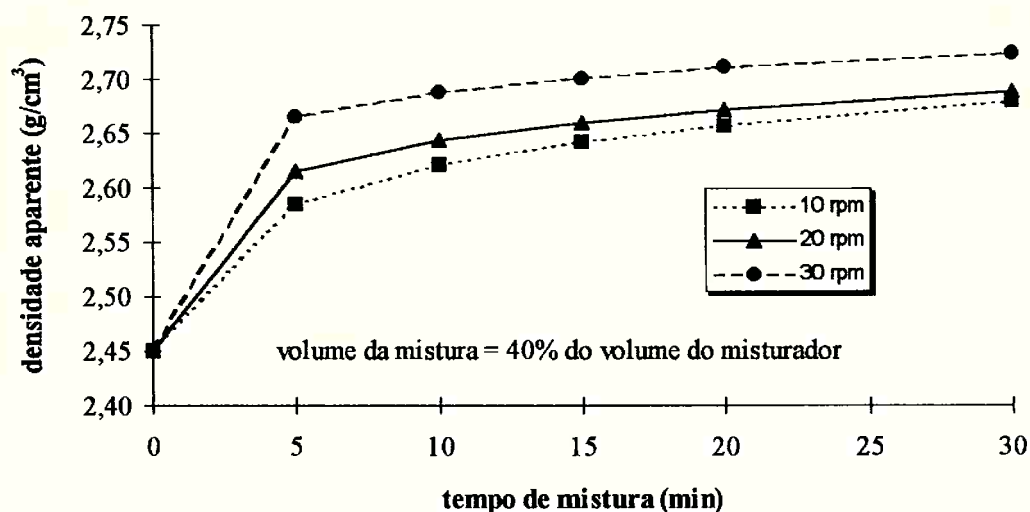


figura 11: Influência do tempo de mistura na densidade aparente da mistura.

Variação da densidade x velocidade de mistura

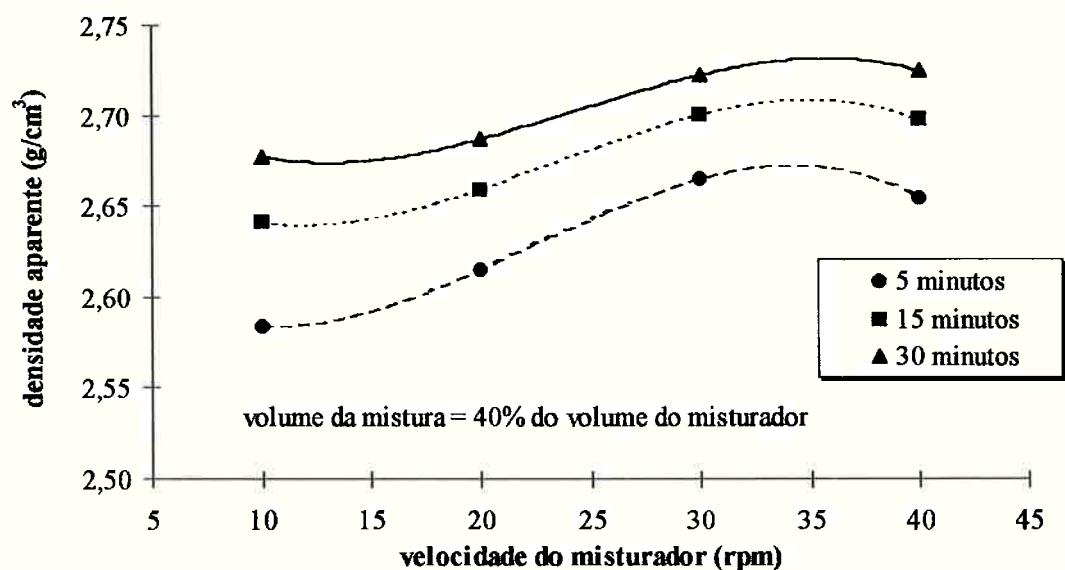


figura 12: Influência da velocidade do misturador na densidade aparente da mistura.

Podemos observar na figura 11 que a medida que aumentamos o tempo de mistura a densidade aparente da mistura cresce através de uma curva logarítmica (7,8,9). Admitindo-se que a densidade da mistura no instante zero (antes de misturar) é igual a

densidade do pó de ferro a ser misturado é possível observar que o grande aumento da densidade se dá nos primeiros cinco minutos do processo ocorrendo depois incrementos suaves na densidade da mistura. Ao observarmos as experiências realizadas foi possível notar também que com o aumento do tempo de mistura o pó da mistura apresentava uma aparência mais homogênea (7,9). Entretanto, acima de trinta minutos de mistura aumentava a segregação de carbono o que era notado pela formação de uma suspensão de partículas de grafita no ar (9).

A figura 12 mostra que velocidades crescentes de mistura aumentam a densidade da mistura (7,9). Porém, existe uma velocidade crítica acima da qual a densidade não aumenta mais e pode até começar a diminuir como observado na figura 12 (9). Sabe-se que para cada misturador existe uma velocidade ideal e apropriada na qual a densidade aparente e a homogeneidade dos componentes é máxima (7,9). Neste trabalho a velocidade ideal para o misturador duplo-cone utilizado nas experiências seria cerca de 60 rpm pelos cálculos descritos na introdução deste trabalho. Todavia, isto não foi observado na prática já que a medida que aumentávamos a velocidade do misturador aumentava também a camada de grafita que se formava na superfície da mistura. Assim, concluiu-se que o cálculo da velocidade ideal de um misturador não é aplicável para misturas de ferro-grafita devido a notável diferença de densidade entre as partículas de ferro e grafita.

Os gráficos apresentados são resultantes de uma média feita entre as várias misturas preparadas. Nos ensaios em que se variou a velocidade do misturador, a menor variação de resultados entre as misturas foi observada quando a velocidade do misturador foi fixada em 20 rpm. Enquanto que as misturas preparadas à 40 rpm variavam quanto ao aumento na densidade, as misturas preparadas à 20 rpm praticamente não tiveram variação no seu comportamento. Ou seja, apresentaram uma maior reprodutibilidade.

A influência do tempo de mistura na velocidade de escoamento das misturas é mostrado na figura 13. A melhoria que ocorre no escoamento da mistura é devido ao adensamento das misturas durante o processo de mistura (figura 11). É interessante notar que ao contrario da figura 11 onde a densidade cresce continuamente com o tempo de mistura na figura 13 ocorre inicialmente um aumento no tempo de escoamento e posteriormente começa a haver uma queda no tempo de escoamento da mistura. Outro ponto importante a destacar é que a velocidade de mistura não tem uma influência significativa no escoamento da mistura.

Velocidade de Escoamento x tempo de mistura

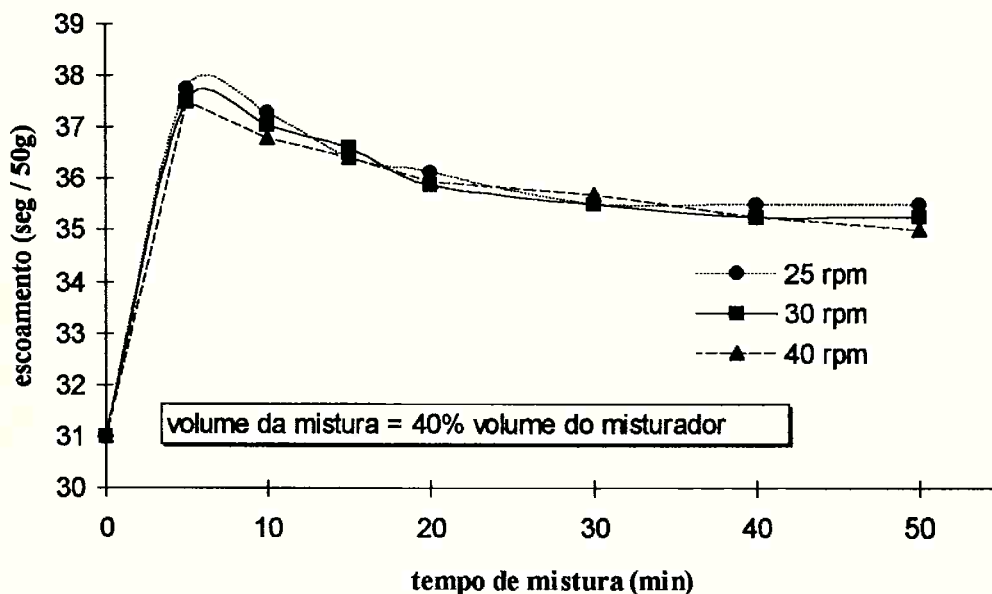


figura 13: Influência do tempo de misturação na velocidade de escoamento das misturas.

Com base nestas informações apresentadas podemos concluir que tempos de mistura entre 15 e 20 minutos são ideais para este tipo de misturador já que neste ponto do gráfico tanto a densidade (figura 11) como a velocidade de escoamento praticamente já atingiram o seu valor máximo. Tempos mais longos de mistura já não são efetivos no aumento da densidade e da velocidade de escoamento e acabam incentivando a formação de uma camada cada vez espessa de grafita segregada na superfície da mistura.

A figura 14 mostra a influência do volume de pó misturado na densidade aparente e na velocidade de escoamento da mistura. Pode-se notar que esta é uma variável que não tem influência sobre a densidade e o escoamento da mistura. Sabe-se através da literatura que existe um volume ideal de mistura onde a mistura se encontra a mais homogênea possível (7,9). Esperava-se encontrar algo semelhante para a densidade e o escoamento. Não existe um consenso quanto ao volume ideal a ser misturado. Na literatura este volume varia entre 20 e 50% do volume do misturador(3,9). Sabe-se apenas que volumes abaixo de 20% do misturador e acima de 50% do misturador são ineficientes na produção de misturas de alta qualidade.

Variação da Densidade e do Escoamento x Volume da mistura

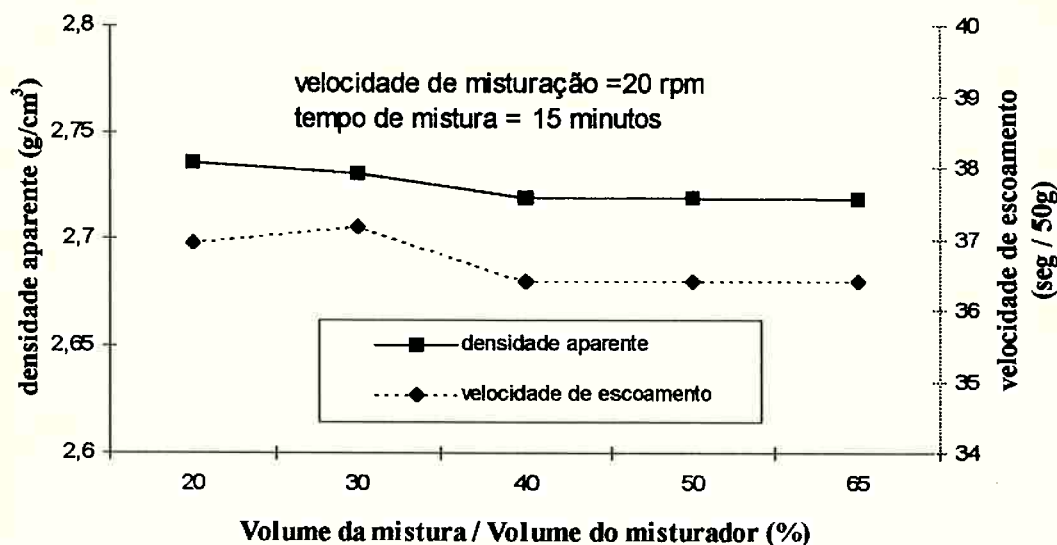


figura 14: Influência do volume de pó misturado na densidade aparente e na velocidade de escoamento da mistura.

A variação na densidade do pó de ferro utilizado na preparação das misturas é apresentada na figura 15. Pode-se notar que a variação na densidade do pó de ferro ocorre dentro do lote de pó de ferro e entre os lotes de pó de ferro. Esta variação é muito significativa podendo chegar a $0,15 \text{ g/cm}^3$.

Densidade do pó de ferro x N° do lote

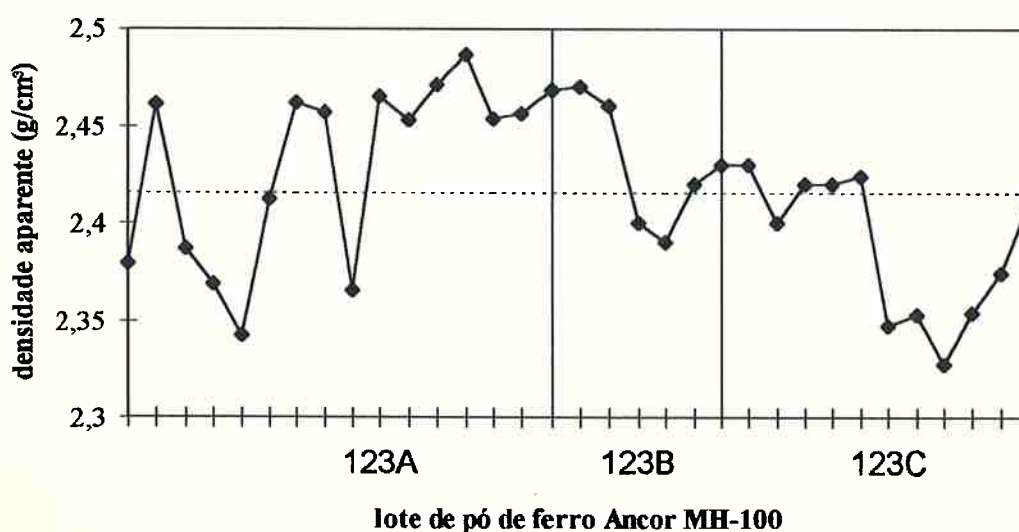


figura 15: Variação da densidade do pó de ferro usado na preparação das misturas.

4. CONCLUSÃO

Com base nestes resultados pode-se concluir que as variações na densidade do pó de ferro utilizado nas misturas é a principal causa da variação que ocorre entre a densidade das misturas já que variações no tempo, na velocidade e no volume das misturas não influenciam a densidade e o escoamento de uma forma marcante. A influência do tempo da velocidade e do volume da mistura parece ser maior no que diz respeito a homogeneidade da mistura , outra propriedade extremamente importante para uma mistura.

O estudo da influência destas variáveis na homogeneidade das misturas pode vir a ser uma continuação deste trabalho bem como o estudo da influência das diferenças de densidade do pó de cobre e grafita a serem misturados.

5. BIBLIOGRAFIA

- 1) POUX, M. ; FAYOLLE, P. ; BERTRAND, J. ; BRIDOUX, D. and BOUSQUET, J. - "Powder Mixing: Some Pratical Rules Applied to Agitaded Systems" - Powder Technology, 1991, vol 68, pag 213 - 234.
- 2) LENEL, F.V. - Powder Metallurgy Principles and Applications, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, 1980.
- 3) FISCHER, J.J - "Solid - Solid Blending" - Chemical Engineering, August 1960, pag 107 - 128.
- 4) MCDERMOTT, M.J. - "P/M Parts Fabrication Experience with ANCORBOND® (Binder Treated) Premixes" - Advances in Powder Metallurgy and Particular Materials, 1990, vol 1, pag 209-236.
- 5) LUK, S.H. and HAMILL, J.A.J. - "Dust and Segregation Free Powders for Flexible P/M Processing" - Advances in Powder Metallurgy and Particular Materials, 1993, vol 1, pag 1-12.
- 6) FAN, L.T. ; CHEN, Y. ; LAI, F.S. - "Recent Developments in Solid Mixing" - Powder Technology, 1990, vol 61, pag 255-287.
- 7) HAUSNER, H.H. and BEDDOW, J.K. - "Bibliography on Powder Mixing and Blending" - Hoeganaes Corporation, Riverton, NJ, 1970.
- 8) KAO, A. and KOCZAK, M.J. - "Mixing and Compacting Behavior of Ferrous Powders" - International Journal of Powder Metallurgy and Powder Technology, 1980, vol 16, pag 105 - 121.
- 9) GERMAN, R.M. - Powder Metallurgy Science, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, 1994, second edition.