



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL

RAULIM DE OLIVEIRA GALVÃO

APLICAÇÃO DE UM PLANEJAMENTO FATORIAL NA RECUPERAÇÃO DA
LIGA METÁLICA (FeSiMn) DE ESCÓRIA EMPREGANDO-SE A MESA
OSCILATÓRIA WILFLEY

RECIFE

2017

RAULIM DE OLIVEIRA GALVÃO

**APLICAÇÃO DE UM PLANEJAMENTO FATORIAL NA RECUPERAÇÃO DA
LIGA METÁLICA (FeSiMn) DE ESCÓRIA EMPREGANDO-SE A MESA
OSCILATÓRIA WILFLEY**

Dissertação submetida ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Pernambuco para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mineral.

Linha de Pesquisa: Minerais industriais.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos da Silva Oliveira.

RECIFE

2017

Catálogo na fonte

Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

G182a Galvão, Raulim de Oliveira.

Aplicação de um planejamento fatorial na recuperação da liga metálica (FeSiMn) de escória empregando-se a mesa oscilatória Wilfley / Raulim de Oliveira Galvão. – 2017.

99 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos da Silva Oliveira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, 2017.

Inclui Referências.

1. Engenharia Mineral. 2. Beneficiamento gravimétrico. 3. FeSiMn. 4. Wilfley. 5. ANOVA. 6. Recuperação metalúrgica. I. Oliveira, José Carlos da Silva. (Orientador). II. Título.

UFPE

622.35 CDD (22. ed.)

BCTG/2017-210



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL
PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA

APLICAÇÃO DE UM PLANEJAMENTO FATORIAL NA RECUPERAÇÃO DA
LIGA METÁLICA (FeSiMn) DE ESCÓRIA EMPREGANDO-SE A MESA
OSCILATÓRIA WILFLEY

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Minerais Industriais

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do **Prof. José Carlos da Silva Oliveira** considera o aluno Raulim de Oliveira Galvão, **Aprovado**.

Recife, 03 de março de 2017

PROF. DR. JOSÉ CARLOS DA SILVA OLIVEIRA

- Orientador – (UFPE)

PROF. DR. BELARMINO BARBOSA LIRA (UFPE)

- Examinador interno – (UFPB)

PROFA. DRA. SHEILA ALVES BEZERRA DA COSTA RÊGO

- Examinador externo – (UFPB)

À minha mãe, ao meu Pai, ao meu irmão Rogério e ao meu amigo David,

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por nunca me deixar desamparado.

Aos Professores do Departamento de Engenharia de Minas da UFPE, pela amizade e orientação, paciência, confiança e incentivos, que foram de fundamental importância para o amadurecimento acadêmico, profissional e pessoal.

Ao Professor José Carlos, por ser o facilitador e orientador que deu apoio e incentivos para enfrentar a jornada em busca de aprimorar os conhecimentos.

À todos os colegas do Programa de Pós-Graduação (PPGEMINAS) que participaram, direta ou indiretamente de todas as dificuldades enfrentadas ao longo do curso. À minha amiga Gabriela que cedeu gentilmente seu tempo em ajudar com os ensaios. Ao amigo Felipe Marinho que esteve todo momento auxiliando no laboratório. Um abraço especial aos amigos paraenses a quem cabe destacar minha amiga Élyda e Viviane, que estiveram no primeiro momento apoiando nas práticas.

Ao meu amigo Técnico do laboratório Marcelo Francisco Gomes que como ninguém sempre demonstrava preocupação na evolução dos ensaios em laboratório

Aos funcionários e Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Pernambuco, pela receptividade e pelo zelo com o aprendizado.

A toda minha família, em especial minha mãe Valdeluce e ao meu irmão e amigo Rogério Galvão por sempre serem prestativos e apoiarem e acreditarem em todos os momentos do mestrado.

Ao meu grande amigo e irmão do peito Marcelo de França, por colaborar com a estadia na cidade do Recife e com as conversas que sempre rendiam pelas madrugadas.

Ao meu amigo David Marzzoni pelas palavras de conforto nas horas difíceis e em outras questões que digo terem sido fundamentais e fonte de inspiração para finalizar este trabalho.

À todos, aos quais não tenho como elencar, mas que colaboraram de alguma forma ou indiretamente para a conclusão do mestrado.

RESUMO

O presente trabalho desenvolveu-se para o beneficiamento de liga metálica de FeSiMn em escórias aplicando o método de concentração gravimétrica em mesa oscilatória do tipo Wilfley. Para alcançar os objetivos do trabalho teve-se que levar em conta os princípios fundamentais do processo de separação de partículas que promovem uma classificação dos sólidos por meio do cisalhamento horizontal, resultante do movimento oscilatório de uma superfície sob a polpa em escoamento. No primeiro momento foram identificados os parâmetros operacionais, parâmetros do material e instrumentação necessária para os ensaios. Os experimentos foram realizados com uma amostra representativa proveniente da empresa Ferro Ligas Marabá (FERMAR). Foi aplicada uma análise da variância baseado num desenho fatorial 2^3 (3 variáveis, 2 níveis), variando a granulometria da alimentação, a inclinação do deque e a amplitude de oscilação da mesa. Como variáveis de resposta foram consideradas a recuperação mássica do material pesado e a sua recuperação metalúrgica. Durante os ensaios foram observados que uma amplitude maior promove uma maior recuperação da liga metálica presente nas frações finas para uma inclinação em 2° . A análise da variância (ANOVA) foi feita utilizando ferramenta estatística para a determinação da variável com maior influência no processo de concentração. Para a recuperação metalúrgica a granulometria, inclinação do deque, amplitude e a interação entre os fatores inclinação e amplitude resultaram em efeitos significativos.

PALAVRAS-CHAVE: Beneficiamento gravimétrico. FeSiMn. Wilfley. ANOVA. Recuperação metalúrgica.

ABSTRACT

The present work was developed for the alloying of FeSiMn alloy in slag using the method of gravimetric concentration in Wilfley type oscillatory table. In order to achieve the objectives of the work it was necessary to take into account the fundamental principles of the particle separation process that promote a classification of the solids by means of the horizontal shear, resulting from the oscillatory movement of a surface under the pulp. At the first moment the operational parameters, parameters of the material and the instrumentation required for the tests were identified. The experiments were carried out with a representative sample from Ferro Ligas Marabá (FERMAR). A variance analysis based on a factorial design 2^3 (3 variables, 2 levels) was applied, varying the grain size of the feed, the incline of the deck and the amplitude of oscillation of the table. As response variables we considered the recovery of the heavy material and its metallurgical recovery. During the tests it was observed that a larger amplitude promotes a greater recovery of the metal alloy present in the fine fractions for a slope in 2° . Analysis of variance (ANOVA) was done using a statistical tool to determine the variable with the greatest influence on the concentration process. For the metallurgical recovery the particle size, slope of the deck, amplitude and the interaction between the slope and amplitude factors resulted in significant effects.

KEYWORDS: Gravimetric processing. FeSiMn. Wilfley. ANOVA. Metallurgical recovery.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Representação esquemática de um Forno Elétrico de Redução (FER) utilizado para a fabricação de ferroligas.....	8
FIGURA 2 - Diagrama expositivo das principais reações ocorridas por zonas do forno elétrico de redução.....	9
FIGURA 3 - Mesa oscilatória Wifley.....	10
FIGURA 4 - Distribuição dos produtos da mesa oscilatória.....	12
FIGURA 5 - Mecanismo de acionamento da mesa Wilfley.....	13
FIGURA 6 - Estratificação vertical entre os riffles.....	14
FIGURA 7 - Trajetórias de partículas em sedimentação no fluido.....	15
FIGURA 8 - Ação do fluxo de filme de água.....	16
FIGURA 9 - Movimento das partículas individuais em um plano inclinado.....	18
FIGURA 10 - Balanço de forças que agem sobre uma partícula posicionada em um deque que realiza movimentos oscilatórios.....	19
FIGURA 11 - Velocidade da água e do deque calculados usando a equação 21 para água a 20°C, considerando um movimento oscilatório de 300 golpes por minuto (N= 5 Hz) e com uma película de 1 mm de espessura.....	22
FIGURA 12 - Áreas de estratificação das partículas.....	25
FIGURA 13 - Movimento relativo de partículas.....	27
FIGURA 14 - Taxas de cisalhamento para um fluido em escoamento em película de água (na direção x) e sob a ação de movimento periódico do deque (direção y) com ângulo de 6°	28
FIGURA 15 - Estratificação entre os riffles em mesas concentradoras.....	30
FIGURA 16 - Estratificação partículas em três seções ao longo do comprimento da mesa.....	31
FIGURA 17 - Ensaios com baixas vazões de água de limpeza na concentração de hematita.....	32
FIGURA 18 - Representação de um modelo geral de processo.....	36
FIGURA 19 - Representação gráfica do valor de p para um teste unilateral.....	39
FIGURA 20 - (a) gráfico de densidade de probabilidade numa distribuição normal padronizada. A probabilidade acumulada correspondente a um valor x_1 é a área sob a curva à esquerda de x_1 (b) probabilidade acumulada na escala cartesiana usual.....	48

FIGURA 21 - Gráfico da figura 20 (b) num eixo de probabilidade normal. Note que a escala de probabilidade acumulada não é mais linear.....	49
FIGURA 22 - Representação gráfica do valor de p para um teste unilateral.....	51
FIGURA 23 - Pilha alongada.....	54
FIGURA 24 - Mesa oscilatória utilizada para os ensaios.....	56
FIGURA 25 - Gráfico da distribuição granulométrica da amostra global.....	57
FIGURA 26 - Partícula de liga metálica incrustada na matriz vítrea	58
FIGURA 27 - Partícula de liga metálica liberada no tamanho de 295 micrômetro.....	58
FIGURA 28 - Imagens lupa binocular exibindo forma das partículas.....	59
FIGURA 29 - Imagens lupa binocular produto concentrado pesado e produto leve, respectivamente.....	60
FIGURA 30 - Gráfico dos efeitos e interações sobre a recuperação mássica de concentrado pesado.....	60
FIGURA 31 - Gráfico normal dos valores dos efeitos e interações sobre a recuperação mássica. Só os efeitos A e BC parecem significativos.....	62
FIGURA 32 - Gráfico da relação entre os fatores BC.....	64
FIGURA 33 - Perfil do ensaio 1 com amplitude 12 mm (a) e do ensaio 5 com amplitude de 14 mm (b)	65
FIGURA 34 - Perfil do ensaio 2 com amplitude 12 mm (a) e do ensaio 6 com amplitude de 14 mm.....	65
FIGURA 35 - Perfil do ensaio 4 com amplitude 12 mm (a) e do ensaio 8 com amplitude de 14 mm (b).....	66
FIGURA 36 - Perfil do ensaio 2 com amplitude 12 mm (a) e do ensaio 6 com amplitude de 14 mm (b).....	67
FIGURA 37 - Perfil do ensaio 3 com amplitude 12 mm (a) e do ensaio 7 com amplitude de 14 mm (b).....	68
FIGURA 38 - Perfil do ensaio 4 com amplitude 12 mm (a) e do ensaio 8 com amplitude de 14 mm (b).....	68
FIGURA 39 - Gráfico da recuperação em massa versus recuperação metalúrgica.....	69
FIGURA 40 - Gráfico dos efeitos e interações sobre a recuperação metalúrgica.....	71

FIGURA 41 - Análise por gráfico normal dos valores dos efeitos e interações sobre a recuperação mássica. Só os efeitos AB, AC e ABC parecem não significativos.....	72
FIGURA 42 - Perfil de separação no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b) para as condições de granulometria fina e granulometria grossa.....	73
FIGURA 43 - Perfil de separação no ensaio 5 (a) e ensaio 7 (b) para as condições de inclinação 2° e 4°, respectivamente.....	73
FIGURA 44 - Perfil de separação no ensaio 4 (a) e ensaio 8 (b) para as condições de amplitude 12 mm e 14 mm, respectivamente.....	74
FIGURA 45 - Gráfico da relação entre os fatores BC.....	76
FIGURA 46 - Perfil do ensaio 1 com amplitude de 12 mm (a) e do ensaio 5 com amplitude de 14 mm (b).....	76
FIGURA 47 - Perfil do ensaio 2 com amplitude 12 mm (a) e do ensaio 6 com amplitude de 14 mm (b).....	76
FIGURA 48 - Perfil do ensaio 3 com amplitude 12 mm (a) e do ensaio 7 com amplitude de 14 mm b).....	76
FIGURA 49 - Perfil do ensaio 4 com amplitude 12 mm (a) e do ensaio 8 com amplitude de 14 mm b)	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Representação do desenvolvimento de um planejamento fatorial 2^3	57
Tabela 2 - Matriz de contraste planejamento fatorial 2^3	58
Tabela 3 - Variáveis e níveis dos testes de concentração na mesa oscilatória	69
Tabela 4 - Planejamento fatorial dos testes de concentração na mesa oscilatória.....	70
Tabela 5 - Análise química da alimentação por FRX.....	76
Tabela 6 - Resultados dos testes de concentração em mesa oscilatória	77
Tabela 7 - Análise da variância para a recuperação mássica.....	78
Tabela 8 - Análise da variância para a recuperação metalúrgica	85

LISTA DE SÍMBOLOS

$a_d, a_{d,cr}, a_{d,max}$	Aceleração, aceleração crítica e aceleração máxima do deque da mesa, respectivamente.
C_D	Coefficiente de arraste.
d_d, d_l	Tamanho da partícula densa e leve, respectivamente.
$d_{máx}$	Tamanho máximo da partícula (top size da amostra).
d_p	Tamanho de partícula.
F	Força.
f, f_d, f_s	Coefficiente de atrito, coeficiente de atrito dinâmico e estático, respectivamente.
F_a	Força de atrito.
F_b	Força de empuxo.
F_D	Força de arraste hidrodinâmico.
F_e	Força externa que age sobre uma partícula.
F_g	Força peso aparente de uma partícula imersa em um fluido.
g	Aceleração da gravidade.
H	Espessura do filme de fluido.
k_s	Rugosidade da superfície.
L	Espessura do leito.
M_e	Teor do metal no composto.
m_f	Massa do fluido deslocado por uma partícula.
m_p	Massa de uma partícula.
N	Frequência de rotações.
Q	Vazão volumétrica de fluido ou polpa.
r	Amplitude das oscilações.
S	Taxa de cisalhamento.
t	Tempo.
u	Velocidade do fluido.
\bar{u}	Velocidade média do fluido.
u^*	Velocidade de cisalhamento do fluido.

$u_{m\acute{a}x}$	Velocidade máxima do deque na mesa.
u_0	Velocidade do fluido na base do deque da mesa.
V_p	Volume de uma partícula.
v_t	Velocidade terminal da partícula em uma polpa.
v_∞	Velocidade terminal da partícula isolada.
y	Distância percorrida pela partícula até sedimentar.
ω	Velocidade de translação da partícula
Z	Profundidade
μ	Coefficiente e viscosidade dinâmica do fluido.
θ	Inclinação da superfície de separação.
θ_{cri}	Inclinação crítica da superfície para que ocorra o movimento da partícula
ρ	Densidade absoluta.
ρ_f	Densidade do fluido.
ρ_s	Densidade da partícula.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	GENERALIDADES	16
1.2	OBJETIVOS	18
1.2.1	Objetivo geral	18
1.2.2	Objetivos específicos	18
1.3	RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	LIGAS DE FERROSÍLICOMANGANÊS (FeSiMn)	20
2.2	PROCESSO DE PRODUÇÃO DE FERRO LIGA	22
2.3	BENEFICIAMENTO GRAVIMÉTRICO	26
2.4	PRINCÍPIOS DO FUNCIONAMENTO DE MESAS OSCILATÓRIA	27
2.5	FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA SEPARAÇÃO	30
2.5.1	Velocidade diferencial de partículas	31
2.5.2	Movimento de oscilação do deque, transversal ao escoamento da película de água	36
2.5.3	Taxas de cisalhamento e estratificação das partículas entre os riffles ..	43
2.6	VARIÁVEIS DE OPERAÇÃO DE MESAS OSCILATÓRIA	47
2.6.1	Inclinação lateral e longitudinal do deque	48
2.6.2	Amplitude e frequência de oscilações	49
2.6.3	Concentração de sólidos	49
2.6.4	Vazão da água de lavagem	50
2.6.5	Taxa de alimentação	51
2.6.6	Tamanho e forma das partículas	52
2.7	PLANEJAMENTO FATORIAL.....	53
2.7.1	Planejamento fatorial 2³	56
2.7.1.1	Cálculo dos efeitos principais e interações.....	58
2.7.1.2	Estimativa de erro.....	60
2.7.1.3	Interpretação dos resultados	61
2.7.1.4	Análise por meio de gráficos normais	62

3	METODOLOGIA	65
3.1	AMOSTRAGEM.....	65
3.2	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	65
3.2.1	Classificação granulométrica	66
3.2.2	Composição química	66
3.2.3	Cálculo da recuperação metalúrgica	67
3.2.4	Análise microscópica	67
3.2.5	Determinação da densidade	67
3.2.6	Análise qualitativa do grau de liberação	68
3.3	ENSAIOS NA MESA OSCILATÓRIA.....	68
3.4	PLANEJAMENTO FATORIAL.....	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA.....	71
4.1.1	Análise óptica da amostra	72
4.1.2	Análise de microscopia eletrônica de varredura	74
4.1.3	Análise química	76
4.2	ENSAIOS E PLANEJAMENTO FATORIAL	76
4.2.1	Análise dos efeitos e interações na recuperação mássica do concentrado	78
4.2.2	Análise dos efeitos e interações na recuperação metalúrgica	84
5	CONCLUSÕES	93
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	94
	REFERÊNCIAS	95

1 INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

A produção de ligas FeSiMn é realizada em fornos elétricos de redução. O processo consiste na alimentação contínua através das bocas de carregamento, situadas na parte superior do forno, de uma mistura de minérios de manganês, fundentes e redutores. Devido à limitação do processo de fundição, a liga ferrosílicomanganês é particionada para a fase escória proporcionando elevado percentual de elemento de liga a ser descartada nas pilhas de rejeitos.

Esforços significativos em pesquisas têm sido focados na recuperação de metais a partir de rejeitos de plantas metalúrgicas. Tal importância advém dos princípios norteadores de proteção do meio ambiente e na visão econômica de reincorporação do material à planta de processamento diminuindo, assim a necessidade de quantidades elevadas de matérias primas minerais.

A utilização e beneficiamento de escórias ou rejeitos siderúrgicos podem ser conduzidos por técnicas que exploram as diferenças de densidade entre o material de interesse e a fase vítrea escorificante. Dentre as técnicas, classificadas como processos de concentração gravimétrica amplamente empregadas na recuperação de nódulos de liga metálica destaca-se a concentração em mesas oscilatórias.

A concentração gravimétrica pode ser definida como um processo no qual partículas de diferentes densidades, tamanhos e formas são separadas uma das outras por ação da força de gravidade, por forças centrífugas ou por forças conjuntas. A concentração gravimétrica é um dos processos mais antigos de concentração de minérios utilizadas pelo homem e permanece ainda como um importante método de concentração física.

Aparelhos de concentração gravimétrica do tipo mesa oscilatória é destacada em vários trabalhos pela elevada precisão de separação, superior à de qualquer outro tipo de equipamento de separação hidráulica gravitacional. Em função disso, a mesa oscilatória tornou-se o principal equipamento utilizado em usinas de beneficiamento de minérios metálicos, areais e carvões.

A mesa oscilatória é caracterizada por uma superfície inclinada, que dispõe de pequenas saliências (rifles) posicionadas de forma paralela, ao longo do comprimento da

mesma. Há um movimento assimétrico na direção longitudinal, e um filme de água que atravessa a superfície da mesa de forma transversal. Ressalta-se, que o efeito do filme líquido e da movimentação assimétrica depende da densidade e do tamanho da partícula. Assim, em função das diferenças de densidades da liga metálica (6,2 g/cm³) e da escória (3,1 g/cm³) justifica-se a aplicação da mesa oscilatória como uma técnica promissora para aproveitamento do material.

Em testes de mesas concentradoras as principais variáveis a serem conhecidas para a otimização da recuperação metalúrgica são a distribuição granulométrica do material e a diferença de densidade das partículas de interesse e de ganga, a inclinação da mesa, a amplitude e frequência das oscilações, a taxa de alimentação, a porcentagem de sólidos e a vazão de água de lavagem.

Poucas pesquisas têm sido direcionadas para a vasta aplicação da mesa oscilatória no aproveitamento de elementos de liga metálica em escórias cabendo citar os trabalhos de Teixeira et.al (2015) que utiliza o equipamento para recuperação de ligas de ferro-cromo. Ainda assim, a concentração de ligas metálica de escórias por métodos em mesas oferece boas condições de recuperação e operacionalidade, permitindo a reaproveitamento do material que até então é considerado rejeito. Tal estudo faz-se importante e imprescindível para avaliar a viabilidade operacional na recuperação de ligas de FeSiMn presente na fase escória podendo confirmar a mesa oscilatória como uma técnica importante na recuperação deste material.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

- Este trabalho visa avaliar a influência da granulometria da alimentação, da inclinação do deque e da amplitude na concentração gravimétrica por mesa oscilatória de uma liga metálica de FeSiMn da empresa FERMAR, a partir de testes realizados com amostras de escória.

1.2.2 Objetivos específicos

- Planejar, executar e analisar os resultados de ensaios de recuperação de uma liga metálica de FeSiMn a partir de uma escória em uma mesa oscilatória do tipo Wilfley;
- Estabelecer o desempenho metalúrgico em função das variáveis de granulometria, de inclinação do deque e amplitude.

1.3 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA

Poucos trabalhos têm se dedicado a estudar a recuperação de metais a partir de escórias. Esta situação, em especial nas regiões que ainda exibem uma grande quantidade de matérias primas disponíveis se agrava ainda mais. A carência em desenvolver medidas sustentáveis para a reciclagem de ligas a partir de escória faz com que predomine inúmeras pilhas de rejeito ao longo de pátios de empresas siderúrgicas acarretando em um passivo ambiental de proporções gigantescas.

O polo industrial da cidade de Marabá, estado do Pará, com as inúmeras siderúrgicas implantadas, infelizmente figura esta realidade. Em face da potencialidade de aproveitamento econômico a partir da reciclagem destes materiais siderúrgicos por métodos gravimétricos, o trabalho pretende estudar das variáveis que interferem na recuperação da liga metálica de FeSiMn, a fim de ser uma referência para trabalhos posteriores em que se pretendam otimizar a concentração por mesas oscilatórias.

Muitos estudos de concentração gravimétrica em mesas oscilatórias evidenciam alguns parâmetros que visam melhor conhecer e aprimorar o processo. Esse fato se deve a inúmeros fatores que antes desconhecidos, hoje estão sendo melhores esclarecidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LIGAS DE FERROSÍLICOMANGANÊS (FeSiMn)

O manganês e o silício podem ser categorizados como constituintes cruciais na fabricação de aço, tais elementos são utilizados como elementos desoxidantes e dessulfurizantes. No entanto, entendendo a demanda por estes dois elementos, podemos afirmar que a utilização principal do silício é como desoxidante e o manganês como agente dessulfurante, pois quando comparado com o silício, o manganês é um desoxidante com menor potencial (OLSEN E TANGSTAD, 2004).

Na indústria do ramo de siderurgia o manganês é usado como um elemento de liga em quase todos os tipos de aço. De particular interesse é o seu efeito modificador no sistema ferro-carbono que aumenta a dureza do aço. Mendes (1982) resume que a principal utilização do manganês em processos metalúrgicos é adicionar propriedades ao aço, contribuindo como um importante insumo para aumento da qualidade dos produtos siderúrgicos. De forma sucinta, a importância do manganês está ligada à formação preferencial da fase MnS frente à fase FeS. Estas duas fases apresentam temperaturas de fusão diferentes, sendo a FeS de menor temperatura. Rizzo (2006) colabora ao avaliar os efeitos da estabilidade destas duas fases quando a peça metálica é submetida ao aquecimento durante os trabalhos de conformação mecânica. Continua que a diferença de estabilidade, com a temperatura de fusão menor da fase FeS facilmente gera trincas e rompimentos no aço.

O manganês utilizado na indústria siderúrgica está sob a forma de liga metálica com outros elementos químicos, em especial com o ferro. Em termos descritivos cerca de 93% de todo o manganês produzido está sob a forma de ferro ligas de manganês. Pesquisas realizadas por Khodorovsky (1972) citam que boa parte, aproximadamente 90% de todo este manganês produzido no mundo é consumido pela indústria metalúrgica. Tais informações que discorrem da importância deste elemento visam justamente fortalecer os objetivos que se pretendem alcançar neste trabalho, ao qual é premissa para a reciclagem deste material empilhado nos pátios, negativamente as questões e princípios de sustentabilidade.

Retornando sobre a metalurgia do manganês Lúcio et.al., (1980) cita que a mesma é muito similar à metalurgia do ferro, exceto ao que se refere às maiores temperaturas,

por volta de 1200°C, que é necessário para a redução de óxidos de manganês. Assim muitos dos fenômenos físicos químicos compreendidos para a produção de aço podem ser relacionadas aos fornos elétricos de produção de ligas.

De maneira objetiva a FEAM (2010) definiu o conceito de ferroligas como ligas de ferro combinadas a um ou mais elementos químicos, com a proporção do elemento na composição do ferroliga sempre superior à do ferro. Tal produto metalúrgico pode ser produzido em altos fornos, mas hoje em dia, a fusão em forno elétrico a arco é mais comum que a fusão em alto forno. Desta forma, as ligas de Ferro manganês são produzidas, especialmente em fornos elétricos a arco, a partir de minérios contendo óxidos de manganês e de ferro usando o processo de redução carbotérmica dos minérios (OLSEN et. al., 2007). Araújo (1997) complementa que os motivos que fazem com que a produção de ligas de ferro manganês seja em fornos elétrico a arco está diretamente relacionado à maior temperatura de redução para os óxidos de manganês, o que é relativamente estável para as temperaturas em alto forno. Isso conduz com que o forno elétrico seja mais competitivo quando comparado a um alto forno.

Uma característica da produção de ligas ferro-manganês em forno elétrico a arco por redução carbotérmica é a perda de 20 a 40 % de manganês para a fase escória e para a poeira de forno. As contribuições de Lúcio et. al., (1980) e Rizzo (2006) a partir da compreensão dos diagramas de oxidação de Ellingham nos mostra que as razões da perda de manganês se deve ao fato que a redução indireta de MnO pelo CO (g) não ocorre, ou seja, o Mn é produzido somente através da redução direta pelo C. Em comparação ao sistema ferro-carbono as temperaturas presentes conseguem produzir Fe através da redução indireta de FeO pelo gás CO.

Sobre esta perda elevada na escória Olsen et. al., (1995) comenta que o manganês perdido pode se encontrar na forma de óxidos, assim como na forma metálica, em especial na forma de inclusões de liga metálica em fase vítrea.

No que se refere as reações químicas, o processo de carboredução que é responsável por converter os óxidos metálicos em ferroligas, demanda altas temperaturas. Nestas reações o carbono que é o principal agente redutor, e é fornecido para o meio na forma de coque (coque metalúrgico), carvão mineral ou carvão vegetal (FEAM, 2010). O processo primário para produção deste material pode ser designado genericamente pela combinação nos fornos elétricos de: Minério do óxido de metal + óxido de ferro + redutor → ferroliga + óxido redutor + escória (VON KRUGER, 2010).

Para que possamos melhor entender o material em estudo, cabe citar a definição da escória de FeSiMn apresentada pelo Sumário Mineral (2008). A escória é um resíduo gerado na produção da liga de ferro silício manganês fazendo parte de um grupo constituído de quatro tipos de ligas chamadas de ligas de manganês. Para Murphy (1997), as escórias podem ser consideradas como pedras minerais artificiais, com propriedades físicas similares, cabendo aos estudiosos conseguir identificar as propriedades diferenciadoras para que possam propor as rotas de processamento.

2.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE FERRO LIGA

Uma vez a carga sólida alimentada no forno elétrico, novas condições termodinâmicas, em especial a relação CO/CO₂ conduzirão as reações de conversão dos óxidos metálicos. Segundo Lucio (1978), a maior parte dos óxidos de manganês presentes na carga do forno elétrico é reduzida pelo monóxido de carbono, embora parte também possa ser reduzida pelo hidrogênio dos voláteis do carvão.

A redução de minérios de manganês como abordado anteriormente, ocorre especialmente em fornos elétricos de redução. O FER pode ser compreendido como um reator no formato de um tronco de cone invertido, revestido internamente de refratários e isolantes térmicos, que tem como principal característica a geração de energia por efeito Joule (JMENDO, 2009). No forno, cuja representação esquemática é mostrada na Figura 1, as matérias-primas são alimentadas pela parte superior, os produtos líquidos (escória e ferroliga) são recolhidos na parte inferior, na região denominada de cadinho e o gás produzido no processo é eliminado através de aberturas existentes na abóbada e direcionados ao sistema de despoeiramento.

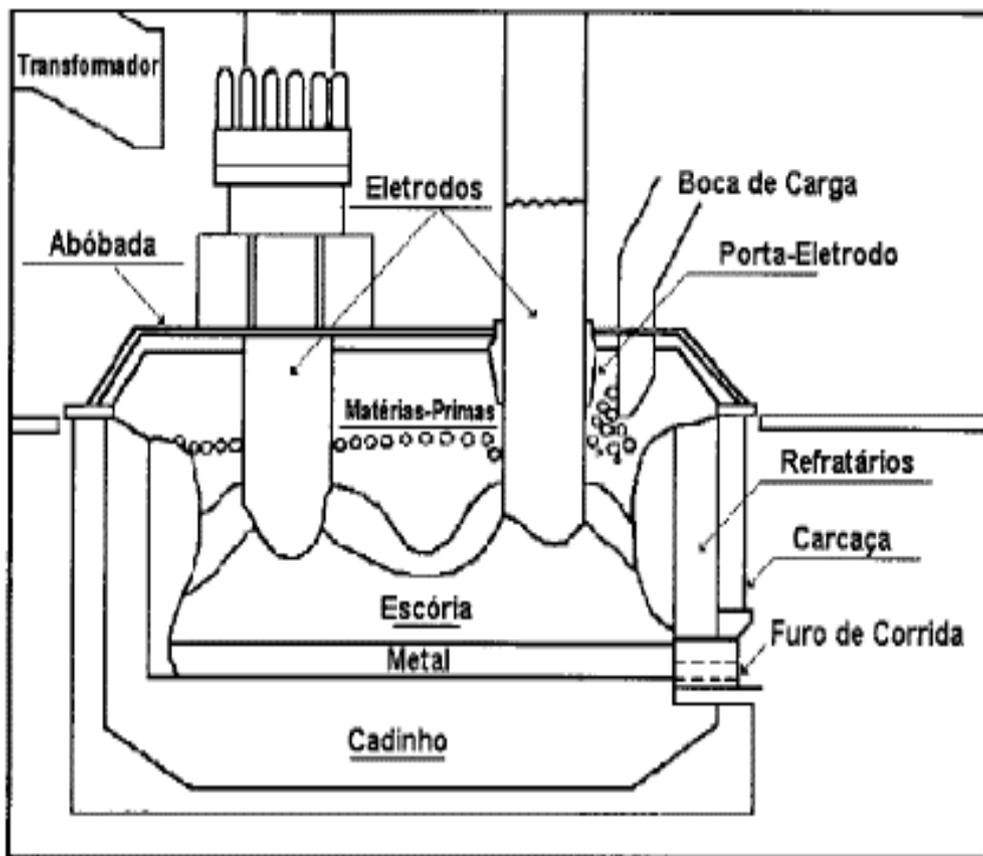


Figura 1 - Representação esquemática de um forno elétrico

Fonte: Silveira & Almeida (1987)

De acordo com Araújo (1997) as elevadas temperaturas ocorrem pelo efeito joule. Continua que a fonte de energia para promover a redução carbotérmica nos fornos a arco submerso é o arco elétrico formado. O arco elétrico é formado entre os eletrodos de carbono quando estes estão em condições de baixo potencial elétrico (ddp) e alta intensidade de corrente elétrica. Desta forma, o mecanismo de conversão da energia elétrica em energia térmica envolve a aplicação de uma corrente alternada nos eletrodos e alta intensidade de corrente gerando conseqüentemente um alto fluxo pelas pontas dos eletrodos proporcionando a formação de arco elétrico com temperaturas de até 2000°C.

Cada forno elétrico apresenta geralmente três eletrodos Soderberg de camisa de aço. A pasta carregada é durante a operação, sendo gradualmente transformada em um condutor sólido com boas propriedades elétricas e mecânicas. A finalidade do eletrodo é conduzir corrente elétrica para dentro do forno.

É válido ressaltar que, ao atingir as temperaturas mais elevadas, que variam com o tipo de liga, a carga, exceção feita ao carbono, amolece e funde. Os líquidos produzidos,

ferroliga e escoria, depositam-se no cadinho, onde ocorre a separação dos dois por diferença de densidades. Em intervalos de tempo preestabelecidos, a liga e a escória são esgotadas do forno através de um furo, denominado "furo de corrida", situado no cadinho. Um esquema do estado interno da carga no interior do forno, em função da temperatura, e apresentado na Figura 2.

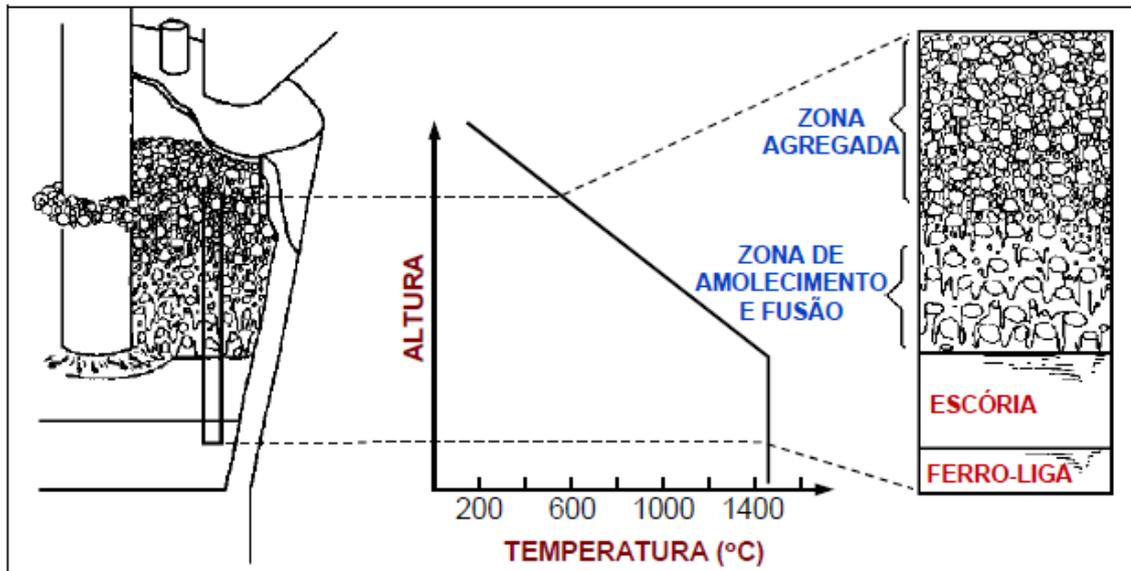


Figura 2 - Representação esquemática do estado interno do FER em função da temperatura.

Fonte: Manual Técnico RDM, (2005)

Na descrição apresentada acima, identificam-se dois pontos básicos: reações químicas e aquecimento da carga desde a temperatura ambiente até a temperatura de fusão. Os dois pontos são igualmente importantes. As reações químicas, porque transformam as matérias-primas no produto de interesse. O aquecimento, porque permite acelerar as reações químicas e colocar o produto numa forma adequada de recuperação. Então, a eficiência do aquecimento e, em parte, responsável pela eficiência do processo, uma vez que está diretamente ligada a velocidade das reações químicas.

Outro ponto importante para compreensão dos fenômenos que ocorrem durante a produção do ferroliga é que o FER, idealmente, pode ser dividido em duas regiões distintas, denominadas zona de preparação e zona de elaboração de carga. Na zona de preparação, localizada na parte superior do forno, a carga é aquecida, perde água de hidratação e sofre descabonatação e no contato com o monóxido de carbono aquecido, proveniente das regiões mais baixas do forno, sofre redução dos óxidos superiores. Na zona de elaboração, situada na parte inferior do forno, a carga é amolecida e fundida, o

carbono reduz os óxidos ainda passíveis de redução, e o equilíbrio escoria-liga se forma. A distinção entre as duas regiões pode ser definida pela reação de regeneração do monóxido de carbono através da gaseificação do carbono, conhecida como reação de Boudouard ou de “solution loss” ($C(s) + CO_2(g) \rightarrow 2CO(g)$), que não ocorre na zona de preparação e é espontânea na zona de elaboração. Toda redução que ocorre na primeira zona não consome diretamente o carbono, diferentemente do que ocorre na segunda.

A temperatura na qual os óxidos serão reduzidos pelo monóxido de carbono depende, termodinamicamente, da composição dos gases no forno, em especial a proporção CO/CO_2 que é responsável por definir o potencial redutor do meio (SILVEIRA & ALMEIDA, 1987). A seguir, a Figura 3 descreve sucintamente as principais reações que acontecem conforme a carga desce no forno elétrico de redução (FER).

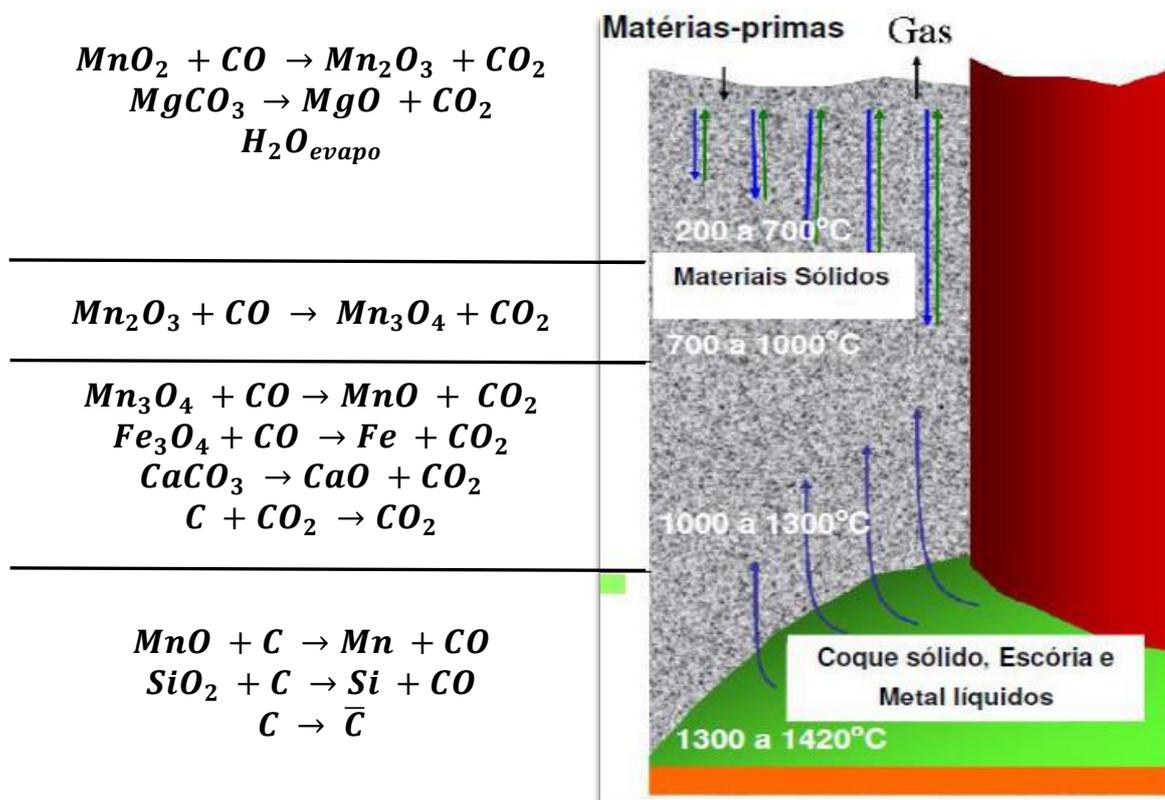


Figura 3 - Diagrama expositivo das principais reações ocorridas por zonas do forno elétrico de redução

Fonte: Adaptado de OLSEN, 2007

2.3 BENEFICIAMENTO GRAVIMÉTRICO

O beneficiamento gravimétrico é um processo de concentração físico em que a separação depende da movimentação relativa das partículas e do fluido envolvido (MULAR et. al., 2002). Os resultados deste processo estão em função de uma série de variáveis e características do material estudado, como massa, tamanho, formato e densidade. Burt (1984) avalia que a facilidade ou a dificuldade nesta separação, entre uma espécie de outra, depende das diferenças relativas de suas características físicas, e não da característica individual de cada população.

Um guia que ajuda a ter uma noção aproximada do potencial e eficiência da aplicação de um método de concentração gravimétrica qualquer pode ser obtido a partir do cálculo do critério de concentração (MULAR et. al., 2002).

$$\text{Critério de concentração} = \left| \frac{\rho_d - \rho_f}{\rho_l - \rho_f} \right| \quad (1)$$

Sendo ρ_d , ρ_l e ρ_f as densidades dos minerais denso, leve e do fluido, respectivamente.

Lins (2010) destaca que quanto mais fino for o tamanho de partícula, mais difícil será a sua separação por meios gravimétricos. Assim a partir de granulometrias abaixo de 74 micrômetros torna-se difícil uma separação eficiente, em qualquer equipamento que utilize apenas a força da gravidade para promover os mecanismos de segregação.

O método de concentração gravimétrica da Mesa Wilfley foi desenvolvido empiricamente no final do século passado por Arthur R. Wilfley e tem sido um fator de importância em muitos processos metalúrgicos. Esta mesa vibratória é um dos equipamentos de concentração gravimétrica mais utilizado no tratamento de minérios e que para muitas aplicações ganha particular importância não sendo igualada em seu funcionamento eficiente e econômico por nenhum outro equipamento.

Com a constatação da eficiência de funcionamento da mesa Wilfley, o seu uso se propagou por todo o mundo e, na tentativa de aprimorar ainda mais o equipamento, novos tipos de mesas foram sendo inventados com o decorrer do tempo (ANDERY, 1980)

2.4 PRINCÍPIOS DO FUNCIONAMENTO DE MESAS OSCILATÓRIA

A ilustração a seguir (Figura 4) exhibe a configuração típica de uma mesa oscilatória do tipo Wilfley.

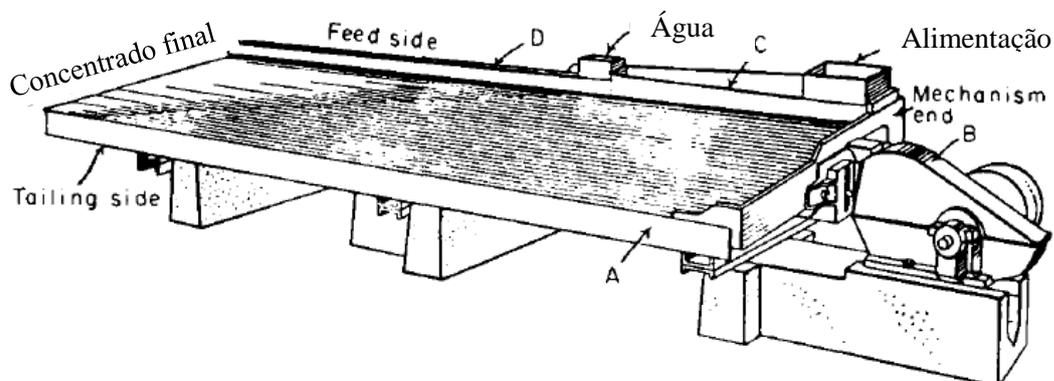


Figura 4 - Mesa oscilatória Wilfley

Fonte: Adaptado de Wills (2006)

A mesa oscilatória consiste de um deque levemente inclinado (A) onde é feita a alimentação na caixa alimentadora que a distribui por todo o compartimento (C). O princípio da mesa, conforme será discutido nos tópicos seguintes, demanda a formação de um filme líquido que é obtido pela distribuição da água de lavagem ao longo do canal de escoamento (D). A mesa vibra no sentido longitudinal, pelo mecanismo de acionamento (B) usando um curso de avanço lento e um retorno rápido que provoca o escorregamento das partículas na referida direção (WILLS, 2006).

Lins (2010) corrobora na interpretação dos processos de concentração em mesas oscilatória. Para ele, as mesas podem ser definidas como equipamentos em que a concentração é caracterizada pelos efeitos do filme líquido fino e do movimento assimétrico que separa os grãos ou as diferentes partículas baseando-se na diferença de densidades, tamanho e forma. Um elemento importante destacado na constituição de uma mesa oscilatória são os retentores ou riffles que cobrem a maior parte do deque.

Uma vez que as partículas se encontram submetidas às duas forças (oscilação e movimento do filme líquido) observa-se uma força resultante diagonal fazendo com que atravessem o deque de forma a serem recolhidas nas posições inferiores (WILLS, 2006). Assim, as partículas densas são descarregadas na extremidade oposta ao mecanismo de acionamento e as partículas leves, por outro lado, são descarregadas ao longo do lado oposto da alimentação (SAMPAIO E TAVARES, 2005)

Na Figura 5 observa-se a segregação das partículas em função da densidade. As partículas menores e mais densas serão direcionadas à área de descarga do produto denso da mesa enquanto que as maiores e mais leves terão trajetória menor e serão recolhidas ao longo do comprimento longitudinal da mesa (WILLS, 2006).

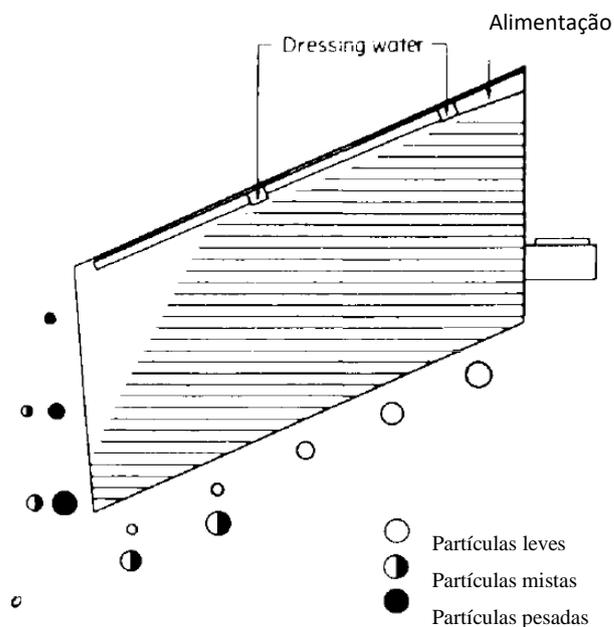


Figura 5 - Distribuição dos produtos da mesa oscilatória

Fonte: Adaptado de Wills (2006)

A ação de vibração da Mesa Wilfley, que resulta na oscilação do deque é produzida através de um mecanismo como o mostrado na Figura 6 e foi didaticamente explicada por Andery (1980).

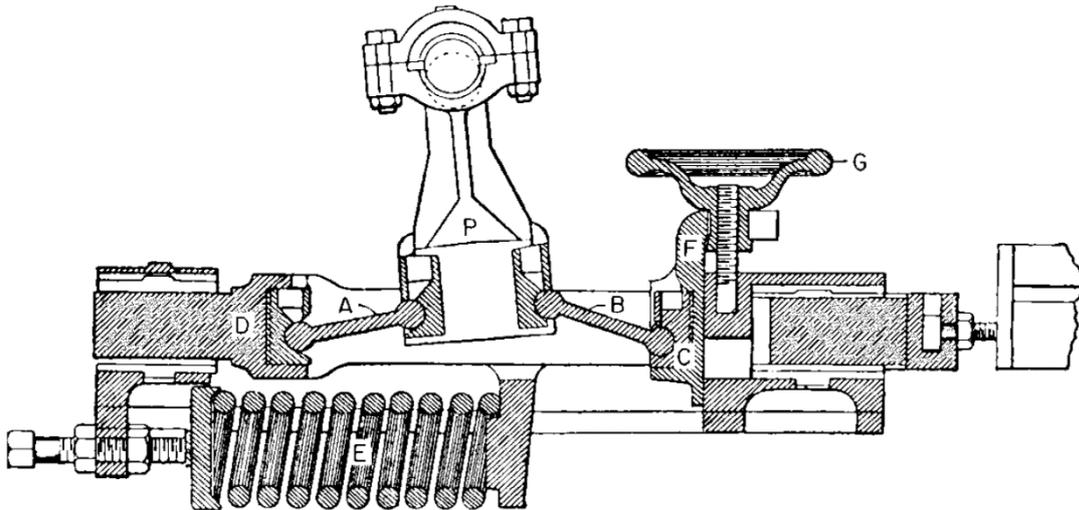


Figura 6 - Mecanismo de acionamento da mesa Wilfley

Fonte: Wills, 2006

O mecanismo consiste de uma biela P acionada por um excêntrico e presa a duas barras móveis A e B. A barra A se articula no quadro D enquanto a barra B se apoia em uma peça fixa C vinculada ao chassi principal. A mola E, aparafusada ao quadro D, serve para manter as barras A e B ajustadas à biela. O comprimento do curso e a energia do impulso podem ser variados através de uma cunha F que desliza sobre um apoio, por acionamento do volante G, podendo elevar ou baixar a extremidade da barra B. Com o aumento da distância entre as barras obtém-se um curso maior e um impulso mais forte, permanecendo a velocidade constante. Para se modificar a frequência de vibração da mesa, a velocidade de rotação do eixo do excêntrico tem que ser alterada.

As duas forças citadas anteriormente (oscilação e movimentação do filme líquido) promovem a movimentação das partículas alimentadas sobre o deque. A força conferida pelo movimento assimétrico promove a estratificação vertical das partículas entre os riffles (Figura 7), colocando as partículas mais finas e mais densas no fundo e as mais grossas e leves próximas ao topo dos riffles. Após a estratificação as partículas estarão sujeitadas à força de movimentação citada por Shahram Shariati (2015). Tal força refere-se à ação da película de água, que desce transversalmente no deque e promove o descarregamento das frações localizadas próximas ao topo do rifle na extremidade oposta à alimentação. O contrário é verificado para as partículas densas e finas leves, que são transportadas no sentido longitudinal da mesa pela ação das oscilações sendo descarregadas na zona de descarga dos produtos densos.

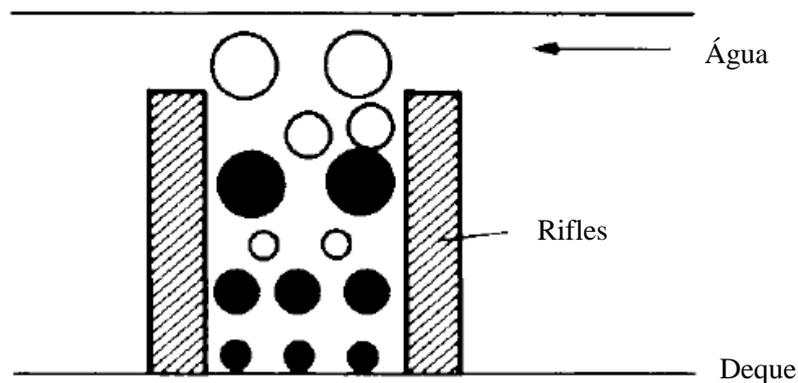


Figura 7 - Estratificação vertical entre os riffles

Fonte: Adaptado de Wills (2006)

O último ponto a destacar é a diminuição da altura dos riffles na direção de descarga do produto denso. Isto coloca as partículas com tamanhos progressivamente menores e densidades maiores em contato com a película de água no topo do riffle promovendo também a separação entre as finas densas e as finas leves (SAMPAIO E TAVARES, 2006).

2.5 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA SEPARAÇÃO

Diversos autores apontam que a separação de partículas pela ação da película de água associado com o movimento oscilatório é resultado da ação de três mecanismos principais (SAMPAIO E TAVARES, 2005; WILLS, 2006; LINS, 2010)

- A velocidade diferencial de partículas em uma película de água
- O movimento de oscilação do deque, transversal, ao escoamento da película de água;
- A estratificação de partículas entre os riffles.

Nos últimos anos, tem havido um considerável avanço no que se refere à modelagem de ambos os mecanismos de concentração gravimétrica envolvidos. Estes modelos levaram indubitavelmente à uma melhor compreensão dos princípios subjacentes e da capacidade de pré-determinar o desempenho do equipamento (MULAR et. al., 2002).

2.5.1 Velocidade diferencial de partículas

Assim que a polpa é alimentada sobre a mesa oscilatória as partículas que se encontram dispersas ou em suspensão iniciam o processo de sedimentação no fluido. A movimentação desta partícula no filme líquido e o devido tempo de sedimentação está em função do tamanho, da forma e da densidade da partícula (APLAN, 2003). Caso o tempo demandando para sedimentação seja alto e durante a sua trajetória a partícula se mantenha em suspensão ela não estará sujeita aos mecanismos responsáveis pela separação gravimétrica (SAMPAIO E TAVARES, 2005). Desta maneira pode-se entender que a concentração por mesas exige que as partículas tratadas sejam suficientes grossas e densas para que assim possam estar sujeitos aos mecanismos que promovem a separação no equipamento.

A granulometria da amostra deve estar compreendida na faixa de 2,0 mm até 37 micrômetros (SAMPAIO, 2007). Entende-se que minérios com elevadas quantidades de finos prejudicam a eficiência do processo de mesagem, e por isso, é aconselhável o descarte desta fração abaixo de 37 micrômetros. Para Burt (2002) as partículas ultrafinas são um problema para todos os equipamentos de concentração gravimétrica com queda brusca de recuperação em materiais mais finos do que 15 micrômetros.

A análise da distância máxima percorrida por uma partícula em um filme líquido até a sua sedimentação sobre o deque da mesa (Figura 8) pode ser estimada pela equação 2, desde que a sedimentação seja considerada no regime de Stokes, fluido newtoniano e escoamento laminar em plano inclinado.

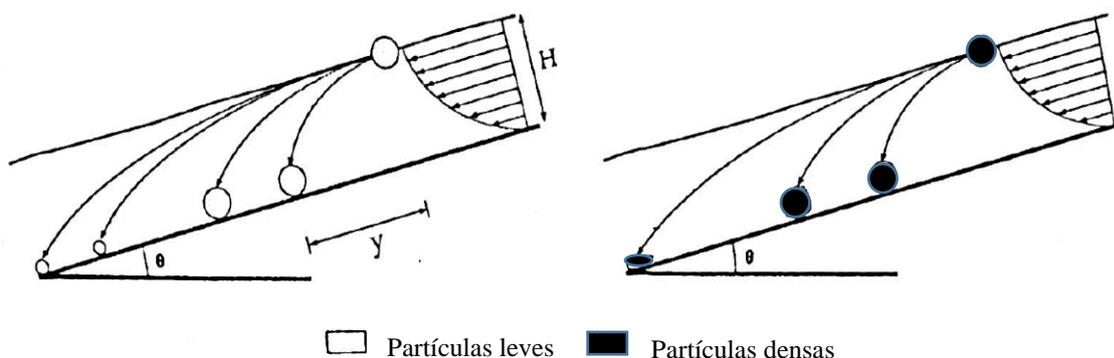


Figura 8 - Trajetórias de partículas em sedimentação no fluido

Fonte: Sampaio e Tavares (2005)

Igualando o tempo para que uma partícula posicionada na interface entre o fluido e o ar atinja a superfície do deque, ao tempo necessário para o escoamento do fluido, tem-se:

$$y = \frac{6\rho_f \tan \theta H^3}{(\rho_s - \rho_f)d_p^2} \quad (2)$$

A variável y representa a distância que a partícula irá ser arrastada no fluido até se depositar no fundo. Sampaio e Tavares (2005) destaca que esta distância deve ser necessariamente menor que o comprimento da superfície de separação.

Para um escoamento laminar, a espessura H do filme líquido varia com a raiz cúbica da vazão do fluido por unidade de largura do aparelho, conforme equação 3.

$$H^3 = \frac{Q 3 \mu}{L \rho_f g \sin \theta} \quad (3)$$

Sendo: μ a viscosidade do fluido, ρ_f a densidade do fluido, ρ_s a densidade do sólido, L a largura do separador, H a profundidade ou espessura do filme, d_p o diâmetro da partícula, Q a vazão de fluido e g a gravidade.

A Figura 9 analisa o efeito da velocidade do filme líquido sobre partículas de tamanhos distintos. Segundo Wills (2006) o gradiente de velocidade aumenta conforme maior distância entre a superfície do deque e a superfície do filme líquido. Esta variação de velocidade faz com que as partículas pequenas densas na superfície do deque não se movam tão rapidamente quanto as partículas grossas, no topo. Considerando mesmo tamanho de partículas o efeito verificado é que as de maior densidade movimentam-se mais lentamente do que as mais leves. Desta maneira o filme fluindo no sentido transversal separa eficazmente partículas grossas e leves de partículas densas e pequenas.

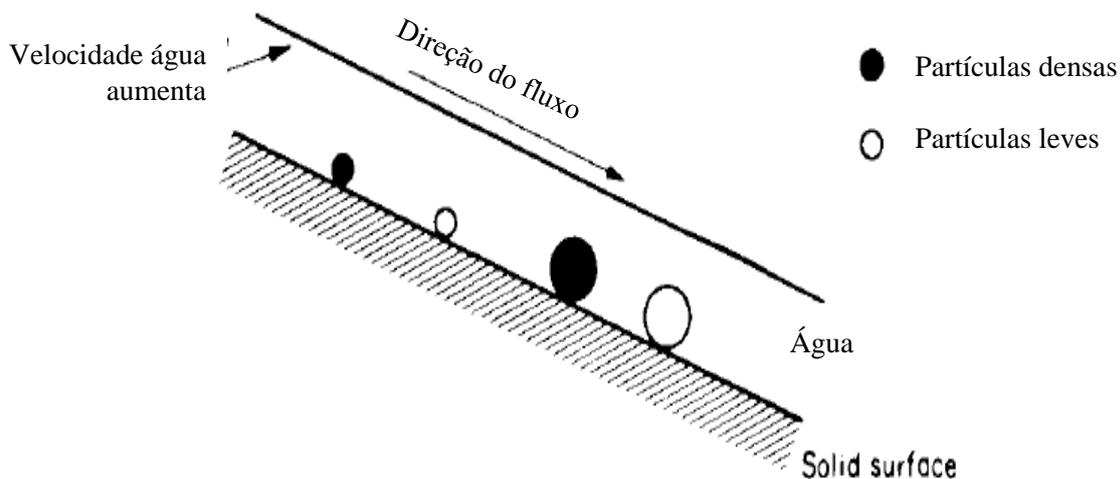


Figura 9 - Ação do fluxo de filme de água

Fonte: Adaptado de Wills (2006)

a) Movimento das partículas depositadas no leito

Após as partículas se depositarem entre os rifles elas serão arrastadas pela corrente de fluido de diversas maneiras, em função principalmente das características das partículas, como tamanho, densidade e forma. Exemplos citados por Lins (2004) são as partículas com hábito placoso que aderem à superfície do deque de forma a serem direcionadas para a área de coleta da fração de pesados, enquanto que partículas formato esféricas, mesmo as densas podem mover-se em direção à área de coleta dos minerais leves. BURT (1984) aponta uma outra interpretação ligada ao maior tempo de sedimentação de partículas com forma achatada. De fato, a forma da partícula irá influenciar no arranjo das partículas sedimentadas, sendo as partículas achatadas se posicionando acima das esféricas.

Para que o movimento das partículas no sentido longitudinal da mesa seja avaliado precisa ser considerado as forças gravitacional, de empuxo, de atrito e de arraste que atuam sobre as partículas depositadas no leito. Sampaio e Tavares (2005) destaca que este movimento longitudinal pode ser interrompido para o caso de vazões elevadas do fluido. Assim vazões altas de fluido erguem o leito fazendo com que as partículas se movimentem por saltação no sentido do filme líquido.

A análise do comportamento de uma partícula depositada entre os riffles que desce longitudinalmente sobre a superfície inclinada pode ser entendida conforme a Figura 10.

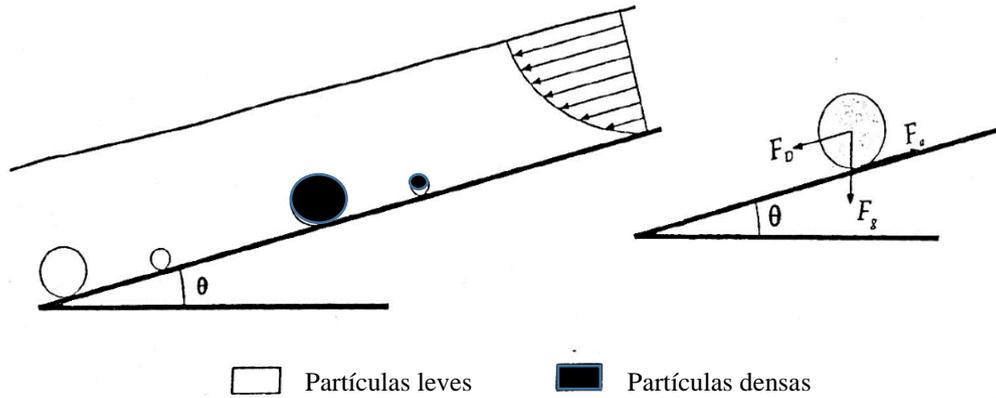


Figura 10 - Movimento das partículas individuais em um plano inclinado

Fonte: Sampaio e Tavares (2005)

Sampaio e Tavares (2005) aplicando as leis físicas da dinâmica consegue estimar o ângulo mínimo de inclinação do plano, necessário para o início do seu movimento, através do balanço de forças que agem na direção paralela ao plano, expressa pela equação 04.

$$m_p \frac{d\omega}{dt} = F_g \sin \theta + F_D - F_a \quad (4)$$

Sendo: F_g , F_D e F_a a força gravitacional, força de arraste e força de atrito, respectivamente, em relação à superfície sólida e ω a velocidade da partícula.

O peso aparente de uma partícula esférica é dado por:

$$F_g = \frac{\pi d_e^3 (\rho_s - \rho_l) g}{6} \quad (5)$$

A força de arraste varia com a posição do centro de massa da partícula, sendo calculada pela integração ao longo das velocidades do fluido, sendo dada por:

$$F_D = \frac{3\rho_f H d_p^2 \sin \theta}{2\psi} - \frac{3\pi\omega d_p}{\psi} - \frac{9\pi g d_p^3 \sin \theta}{16\psi} \quad (6)$$

Sendo ψ a esfericidade da partícula.

A força de atrito que age sobre a partícula pode ser estimada por:

$$F_a = f F_g \cos \theta \quad (7)$$

O coeficiente de atrito entre a partícula em repouso e a superfície (f) precisa ser avaliado e identificado em duas situações: com a partícula estática e com a partícula em movimento. O coeficiente de atrito estático (f_s) denota a situação em que a partícula se encontra na iminência do seu movimento. A partir deste momento, o coeficiente de atrito estático deve ser substituído pelo dinâmico (f_d).

Substituindo as equações 05, 06 e 07 na equação 04, tem-se:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{(\rho_s - \rho_f)g(\sin \theta - f \cos \theta)}{\rho_s} - \frac{18\mu \omega}{\psi \rho_s d_p^2} + \frac{9g\rho_f \sin \theta}{\psi \rho_s} \left(\frac{H}{d_p} - \frac{3}{8} \right) \quad (8)$$

Assim podemos entender que existe um ângulo mínimo necessário para que ocorra o escorregamento da partícula. Este ângulo pode ser entendido como o ângulo crítico, podendo ser calculado considerando a condição limite na qual tanto a aceleração quanto a velocidade são nulas (SAMPAIO E TAVARES, 2005). Assim modificando a equação 08 com a aplicação da condição limite, tem-se:

$$\cot \theta_{cr} = \frac{1}{f_s} \left[\frac{\rho_f}{(\rho_s - \rho_f)} \left(\frac{9H}{d_p} - \frac{3}{8} \right) + 1 \right] \quad (9)$$

Tão logo inicia o seu escorregamento, a partícula pode, em princípio, acelerar até atingir a sua velocidade terminal o que na realidade é a sua desaceleração em relação ao fluido. Esta condição de velocidade terminal é determinada substituindo $d\omega/dt = 0$ na equação 08 de modo que:

$$\omega|_{\text{escorregamento}} = \frac{d_p^2 g \psi \sin \theta}{18\mu} \left[(\rho_s - \rho_f)(1 - f_d \cot \theta) + 9\rho_f \left(\frac{H}{d_p} - \frac{3}{8} \right) \right] \quad (10)$$

A compreensão do rolamento ou escorregamento de uma partícula em um plano inclinado é relacionado por Sampaio e Tavares (2005) ao fator de esfericidade, concluindo que, quanto mais uma partícula se aproxima do formato esférico mais ela realiza rolamento. Em geral, com exceção de partículas cúbicas e placosas, como a galena

e as micas, a maior parte das partículas encontradas apresentam maior tendência a rolar antes do escorregamento.

Considerando o coeficiente de atrito e aceleração igual a zero e pode-se calcular a velocidade terminal de rolamento da partícula de acordo com a equação 08, resultando em:

$$w|_{rolamento} = \frac{d_p^2 g \psi \sin \theta}{18\mu} \left[\rho_s - \rho_f + 9\rho_f \left(\frac{H}{d_p} - \frac{3}{8} \right) \right] \quad (11)$$

A análise dos termos que compõem a equação 11 nos mostra que a velocidade de rolamento é intensamente relacionada à densidade do sólido. Enquanto que para a velocidade de escorregamento o fator de atrito é levado em consideração. As equações 10 e 11 nos leva a compreender que a velocidade de rolamento aumenta com a densidade e que para a sua separação por meio do mecanismo de escoamento seja útil a superfície mineral ou da mesa necessita apresentar alto coeficiente de atrito.

Kusno (2011) concentrando minério de ferro com manganês associado observou que as maiores recuperações de concentrado pesado nas frações -100 +200 mesh estiveram associados à rugosidade da superfície da mesa que era constituída de acrílico com características ásperas.

Outra análise dada pelas equações 10 e 11 é que ambos mecanismos, de rolamento ou escorregamento, são diretamente relacionados com o tamanho das partículas ao quadrado. Sampaio e Tavares (2005) define que em um escoamento não turbulento as partículas mais grossas sofrem a maior ação e se movem mais rapidamente que as menores. Continua que para duas partículas com mesmo tamanho e diferentes densidades, há de se considerar o efeito da maior massa que a partícula de maior densidade apresenta. Tais partículas se deslocam com menor velocidade devido à menor força normal.

2.5.2 Movimento de oscilação do deque, transversal ao escoamento da película de água

Após a sedimentação das partículas entre os riffles, o movimento da partícula é analisado a partir da oscilação produzida horizontalmente no seu plano (Figura 11).

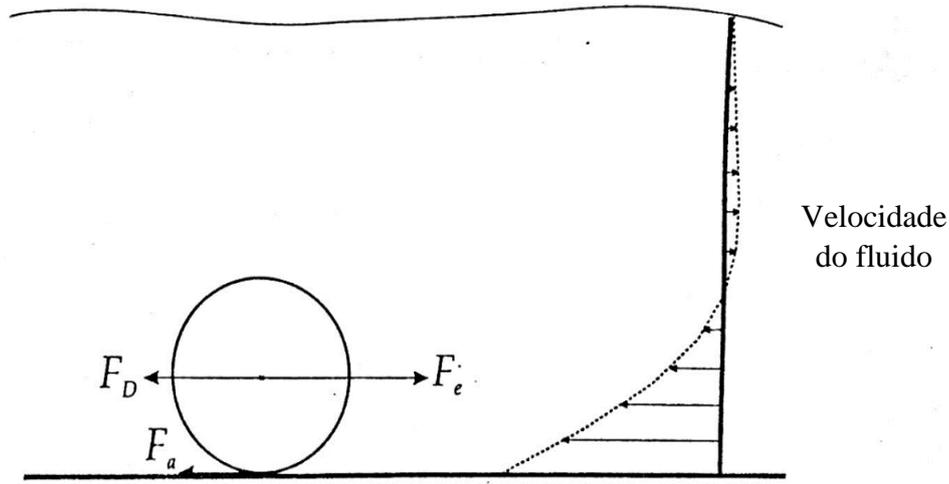


Figura 11 - Balanço de forças que agem sobre uma partícula posicionada em um deque que realiza movimentos oscilatórios.

Fonte: Sampaio e Tavares, 2005

Sampaio e Tavares (2005) descreve o balanço de forças que agem sobre as partículas quando as mesmas estão imersas em água entre os riffles. Com a análise da Figura 11 pode ser formulada o equilíbrio de forças a partir da equação 12.

$$m_p \frac{d\omega}{dt} = F_e - F_a - F_D \quad (12)$$

Sendo que a força externa F_e de aceleração do deque é dada por:

$$F_e = m_p a_d(t) \quad (13)$$

Na qual a_d é a aceleração do deque.

A força de atrito F_a que uma partícula imersa em um fluido repousando sobre uma superfície sofre é dado por:

$$F_a = (m_p - m_f)gf \quad (14)$$

Sendo f o coeficiente de atrito.

Substituindo as equações 13 e 14 na equação 12, tem-se que:

$$m_p \frac{d\omega}{dt} = m_p a_d(t) - (m_p - m_f)gf - F_D \quad (15)$$

Ou

$$\frac{d\omega}{dt} = a_d(t) - \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s} \right) gf - \frac{F_D}{m_p} \quad (16)$$

A condição limite, para o início do movimento relativo entre a partícula e o deque (escorregamento), é aquela em que a partícula se encontra ainda aderida sobre o deque ($d\omega/dt = 0$ e $\omega = 0$) e o coeficiente de atrito atinge o valor máximo estático (f_s), o que resulta:

$$a_{d,cr} = \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s} \right) gf_s + \frac{F_D}{m_p} \quad (17)$$

Quanto menor for o valor da parte à direita da igualdade na equação 17, mais facilmente a partícula irá se escorregar em relação ao deque. Assim, analisando a equação 17, podemos deduzir que partículas grossas e leves irão escorregar com grande facilidade em relação ao deque (provavelmente tanto no movimento para frente como para trás), de maneira que, após um ciclo completo de oscilação, permanecerão aproximadamente na mesma posição. A análise da aceleração crítica de partículas, entretanto, requer o conhecimento da força de arraste F_D , que, por sua vez, depende do perfil de velocidade do fluido.

A análise do movimento oscilatório do deque sob uma película de água faz com que apareça um gradiente de velocidade no fluido, o qual varia com o tempo e com a altura na película. Adicionalmente a variação da velocidade do fluido em relação à altura na película e ao tempo pode ser calculada a partir da equação unidimensional da onda.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\mu}{\rho_f} \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \quad (18)$$

A condição de contorno que designa a equação do movimento da superfície é uma das condições para que se consiga a integração da equação. Considerando, por

simplicidade, que o deque realiza um movimento harmônico simples, no qual a velocidade de superfície do deque ($z=0$) é dada por:

$$u_0 = u_{máx} \cos(2\pi Nt) \quad (19)$$

Sendo $u_{máx}$ a velocidade máxima do deque, que para o movimento harmônico é dada por:

$$u_{máx} = \pi N r \quad (20)$$

Sendo que r e N são a amplitude e a frequência das oscilações, respectivamente. Substituindo a equação 20 na equação 19 tem-se que:

$$a_d|_{z=0} = \frac{du}{dt}|_{z=0} = 2\pi^2 N^2 r \sin(2\pi Nt) \quad (21)$$

A aceleração máxima do deque $a_{d,máx}$ em movimento harmônico simples ocorre no início ou final do período de oscilação, sendo dada por:

$$a_{d,máx} = 2\pi^2 N^2 r \quad (22)$$

A partir da condição de contorno, dada pela equação 19, a solução da equação 18 é dada por:

$$u = u_{máx} \text{EXP} \left(-z \sqrt{\frac{\pi N \rho_f}{\mu}} \right) \cos \left(2\pi Nt - z \sqrt{\frac{\pi N \rho_f}{\mu}} \right) \quad (23)$$

Sendo u a velocidade do fluido na direção x do deque no tempo t .

Analisando a equação 23 observamos que a velocidade do fluido se aproxima à velocidade de oscilação do deque conforme a diminuição da altura do filme líquido. A Figura 12 extraída de Sampaio e Tavares (2005) identificou que, em muitas simulações a velocidade do fluido se torna desprezível em altura de 0,7 mm do deque, e que este

aumento ou diminuição de velocidade, conforme observado, tem relação direta com a frequência de oscilação.

Sampaio e Tavares (2005) ainda observa a velocidade negativa na porção superior da película de água. Os valores negativos se devem ao fato que o fluido, nesta região, se move com velocidade menor em relação ao que se encontra mais próximo ao deque. Estes resultados demonstram que a velocidade do fluido se torna muito pequena próxima da superfície com o ar.

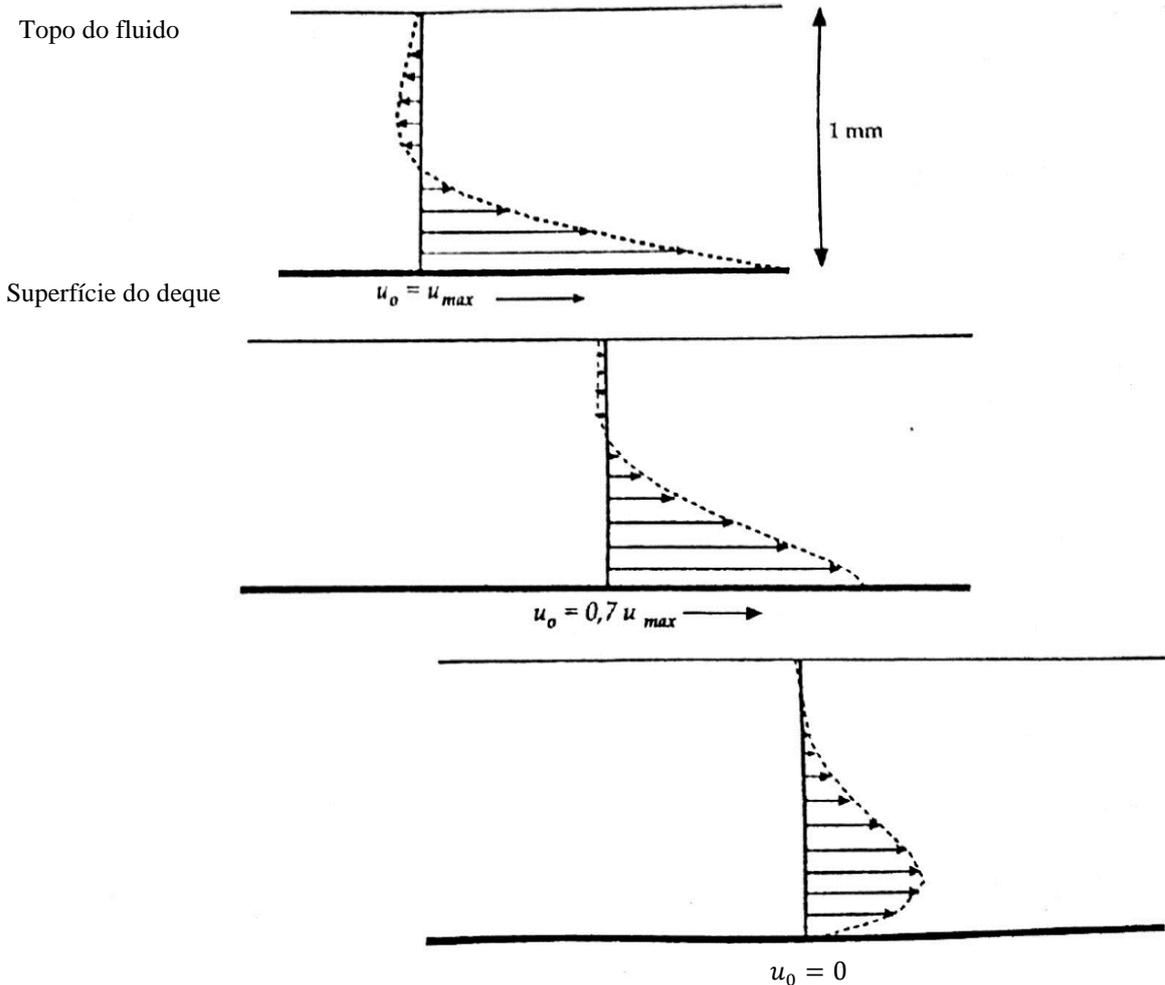


Figura 12 - Velocidade da água e do deque calculados usando a equação 21 para água a 20°C, considerando um movimento oscilatório de 300 golpes por minuto ($N= 5$ Hz) e com uma película de 1 mm de espessura

Fonte: Sampaio e Tavares (2005)

Para esta região que se encontra mais distante do deque, a condição limite para o início do movimento relativo entre a partícula e o deque dada pela equação 17 pode ser simplificada para:

$$a_{d,cr} \cong \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s} \right) g f_s \quad (24)$$

Assim a aceleração mínima para o movimento de partícula, nesta zona, somente depende da densidade do material.

Sampaio e Tavares (2005) correlaciona o efeito do perfil de velocidade apresentado na Figura 12 sobre as partículas muito finas (menores que $50 \mu\text{m}$). Tal tamanho de partícula possuirá a mesma velocidade do deque, já que ficam aderida junto ao fluido nas regiões mais inferiores próximas ao deque.

A análise conjunta dos mecanismos existentes na mesa oscilatória nos permite concluir que as partículas se encontram submetidas simultaneamente ao movimento do deque e ao movimento da película de água. Sampaio e Tavares (2005) descreve que a ação da película de água induz um movimento diferencial das partículas na direção transversal do deque, enquanto que a ação das oscilações faz com que partículas finas e densas apresentem uma maior velocidade na direção longitudinal do que as grossas e leves, que é o oposto do que a película de água promove.

Wills (2006) complementa que no movimento da película de água, as partículas leves e grossas são sujeitas a altas forças de arraste, por estarem mais altas no perfil de velocidade, apresentando assim, maior velocidade que as finas densas.

Como resultado da soma vetorial das forças ligadas às oscilações assimétricas e à movimentação do filme líquido as partículas percorrem uma trajetória diagonal na mesa. A partir do entendimento destes mecanismos de separação que atuam na mesa oscilatória podemos designar relativamente as regiões de descargas dos produtos densos e leves, conforme apontado por Andery (1980) e ilustrado nas Figuras 13 e 14.

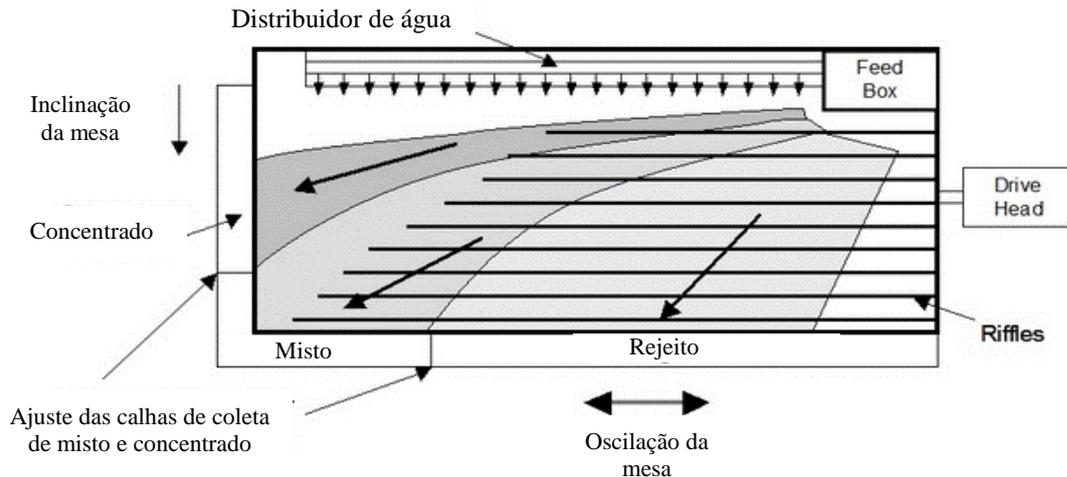


Figura 13 - Áreas de estratificação das partículas

Fonte: <https://www.911metallurgist.com/blog/gold-shaking-tables>

E é exatamente a combinação destas forças na mesa oscilatória, apontada por diversos autores que permite em um modelo ideal a segregação exata de três produtos distintos. Na região longitudinal, mais próxima ao mecanismo de oscilação obtêm-se as frações grossas e finas leves, enquanto que na região final do comprimento da mesa e início da seção lateral o descarregamento das partículas mistas. Já na parte abaixo da metade da seção lateral ocorre a descarga da fração pesada.

Falcon (1982) afirma que em qualquer processo de concentração gravimétrica uma proporção alta de partículas pequenas e pesadas tem tendência de serem reportadas ao produto das partículas grossas leves, caracterizando um ponto que merece destaque na otimização das variáveis e controle. A Figura 14 ilustra o perfil de deslocamento de partículas finas e grossas para as respectivas zonas de coleta.

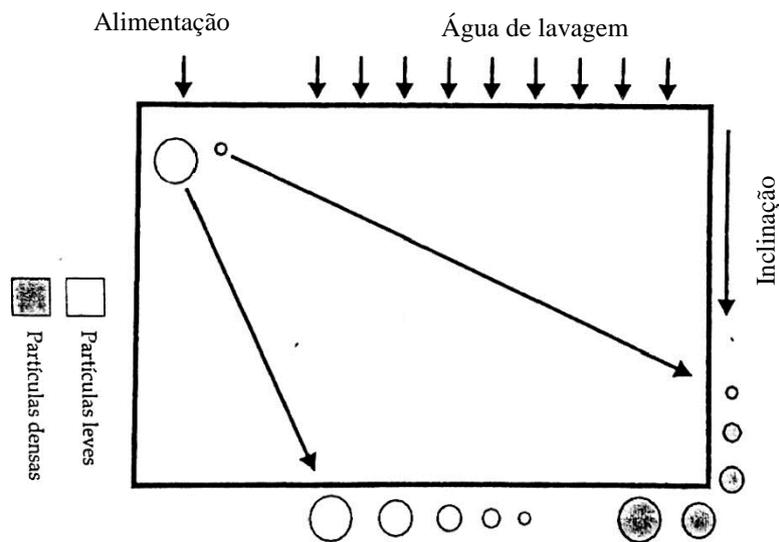


Figura 14 - Movimento relativo de partículas

Fonte: Adaptado de Sampaio e Tavares (2005)

Malayoglu (2010) estudou a recuperação de manganês nas frações de 1 mm - 0,5 mm; 0,5 mm- 0,3 mm e menor que 0,3 mm. Os resultados obtidos com a separação em mesas concentradoras permitiram a segregação das partículas em cinco classes: rejeito, concentrado, misto 1, misto 2 e misto 3. Foi verificado que nas granulometrias de 1 mm- 0,5 mm e 0,5 mm- 0,3 mm foram obtidos os maiores teores de manganês nas frações mistas e os maiores teores na fração concentrada quando comparados aos dados da fração menor que 0,3 mm. Para a fração de menor granulometria verificou-se uma maior recuperação em massa de rejeito com teor de 12%, justificando assim, menores recuperações nas frações mistas.

2.5.3 Taxas de cisalhamento e estratificação das partículas entre os riffles

Os vários constituintes minerais são estratificados por serem submetidos a fluidização intermitente num plano vertical (MULAR et. al., 2002). Para a compreensão da estratificação das partículas entre os riffles faz-se necessário avaliar o efeito das forças de dispersão de Bagnold que surgem, mesmo quando o leito é formado apenas por duas ou três camadas de partículas.

As forças de Bagnold surge quando uma suspensão de partículas é submetida a um cisalhamento contínuo. Uma razão apontada para isto é a tendência ao

desenvolvimento de pressões através do plano de cisalhamento que são perpendiculares a este plano, podendo resultar na segregação das partículas.

Lins (2010) explica que este esforço de cisalhamento pode surgir de uma polpa fluindo sobre uma superfície inclinada, ou ser produzido por um movimento da superfície sob a polpa, ou ainda a combinação dos dois. O efeito resultante desses esforços de cisalhamento sobre uma partícula é diretamente proporcional ao quadrado do diâmetro da partícula e decresce com o aumento da densidade. Deste modo, as forças de Bagnold provocam uma estratificação vertical: partículas grossas e leves em cima, seguindo-se de finas leves e grossas pesadas, com as finas pesadas próximas à superfície do plano.

Um artigo que aborda questões importantes sobre as forças de Bagnold é o de Cavalcante (1995). Ao analisar a lavabilidade de carvões em espirais deduziu que a estratificação de um leito contendo apenas partículas grosseiras com alta porcentagem de sólidos, encontrou dificuldades na separação. A dificuldade na separação esteve ligada ao baixo volume de água que acarretou aumento de turbulência no fluxo interferindo na atuação das forças centrífuga e de Bagnold.

Na separação em mesas o cisalhamento ocorre tanto na direção longitudinal (devido à ação das oscilações), quanto na direção transversal (devido à ação da película de água).

Supondo-se, por simplicidade, que as taxas de cisalhamento no leito são as mesmas que no fluido para o movimento harmônico do deque na direção longitudinal, ela pode ser estimada diferenciando-se a equação 23. O resultado da diferenciação é mostrado na equação 25 ao qual consta que a taxa de cisalhamento varia com o tempo e a altura na película de fluido (SAMPAIO E TAVARES, 2005).

$$\frac{du}{dz} = u_{m\acute{a}x} \sqrt{\frac{\pi N \rho_f}{\mu}} \text{EXP} \left(-z \sqrt{\frac{\pi N \rho_f}{\mu}} \right) \left[\sin \left(2\pi N t - z \sqrt{\frac{\pi N \rho_f}{\mu}} \right) - \cos \left(2\pi N t - z \sqrt{\frac{\pi N \rho_f}{\mu}} \right) \right] \quad (25)$$

Por outro lado, a taxa de cisalhamento resultante do escoamento do fluido em regime laminar em um plano inclinado pode ser expressa por:

$$\frac{du}{dz} = \frac{\rho_f(H - z) \sin \theta}{\mu} \quad (26)$$

Sampaio e Tavares (2005) por meio da Figura 15 apresenta os valores da variação taxa de cisalhamento em função da altura z em relação ao deque. Os resultados apresentados demonstram que ambos os mecanismos produzem taxas de cisalhamento mais alto próximo ao deque, e que diminuem à medida que se aproxima da interface entre a polpa e o ar.

Os valores elevados de taxa de cisalhamento nas regiões mais próximos ao deque fazem com que as partículas grossas leves subam dentro do leito, em função da necessidade de manutenção do regime de inércia de partícula.

O valor mais elevado das taxas de cisalhamento nas primeiras regiões próximas ao deque demonstra a importância da aplicação dos movimentos oscilatórios do deque na separação, especialmente quando há a necessidade da separação precisa de partículas finas. Quando o cisalhamento é produzido apenas pelo fluxo de polpa, a vazão tem de ser substancial para criar esforços suficientes para uma separação, requerendo-se normalmente mais inclinações da superfície.

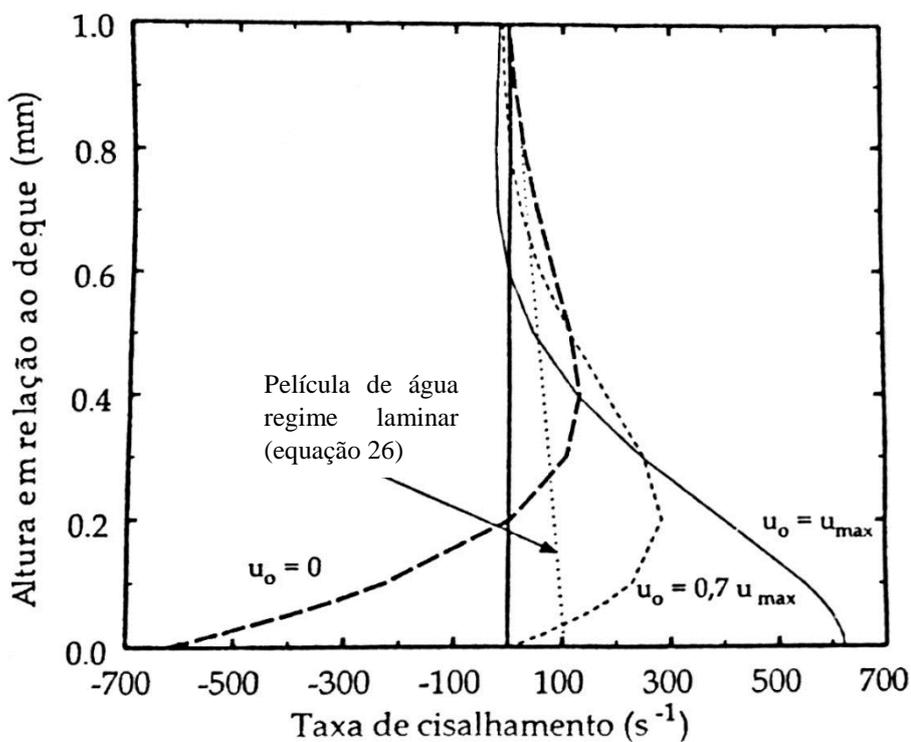


Figura 15 - Taxas de cisalhamento para um fluido em escoamento em película de água (na direção x) e sob a ação de movimento periódico do deque (direção y) com ângulo de 6°

Fonte: Adaptado de Sampaio e Tavares (2005)

Uma vez alimentadas na mesa oscilatória uma grande parte das partículas ocuparão as posições entre os riffles onde estarão sujeitas aos movimentos oscilatórios do deque. Os riffles adquirem uma grande importância, em especial, por permitir que o leito possa ser processado em várias camadas de partículas.

A Figura 16 nos permite ter uma visualização dos efeitos que a turbulência gerada pelo escoamento do fluido promove entre os riffles. Tais efeitos são os responsáveis por promover a repetida expansão e compactação do leito ao qual fica sujeito à ação dos mecanismos da consolidação intersticial, da sedimentação retardada diferencial e do rebaixamento da energia potencial gravitacional do leito. Estes mecanismos são citados por Wills (2006) como os responsáveis por promover a estratificação, de modo que as mais finas e as mais pesadas ficam próximas à superfície do deque e as partículas mais grossas e mais leves ficam próximas ao topo. Sampaio e Tavares (2005) também aborda a dificuldade que as partículas grossas, mesmo densas, encontram em penetrar através do leito.

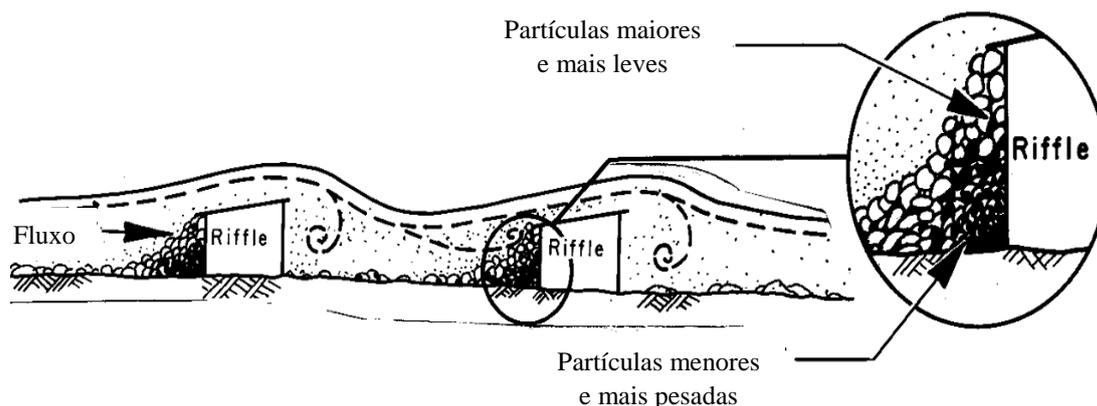


Figura 16 - Estratificação entre os riffles em mesas concentradoras

Fonte: Adaptado de Pryor (1965).

Por fim vale destacar a diminuição que ocorre na altura do riffles na direção longitudinal da mesa. A Figura 17 analisa o perfil e a estratificação das partículas em três seções ao longo do comprimento longitudinal de uma mesa oscilatória. A seção A está mais próxima ao mecanismo de oscilação e a seção C no final do comprimento dos riffles. Observa-se que conforme se direciona no sentido de diminuir a altura do riffle, menor a probabilidade de partícula grossas leves estejam no leito, já que estiveram constantemente sob a maior ação do fluxo laminar do filme de água.

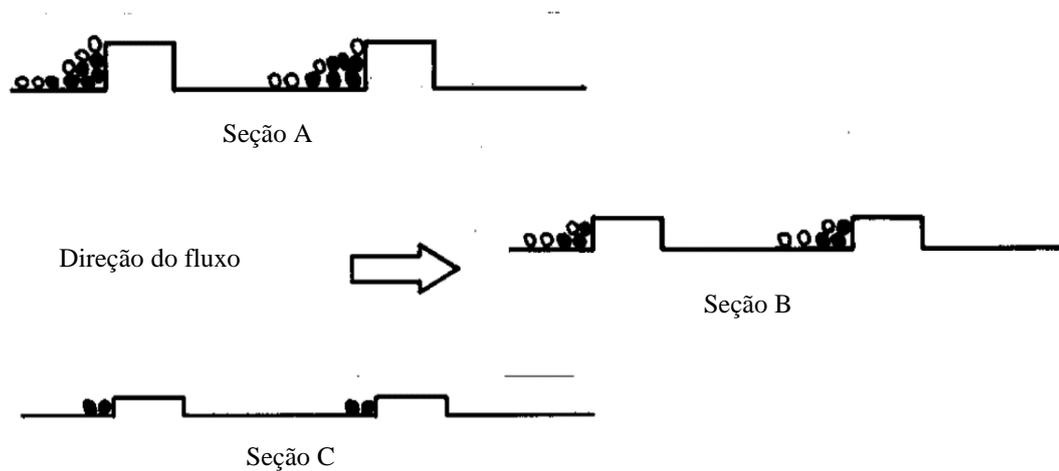


Figura 17 - Estratificação partículas em três seções ao longo do comprimento da mesa

Fonte: Adaptado de Michael (1986).

2.6 VARIÁVEIS DE OPERAÇÃO DE MESAS OSCILATÓRIA

Para que os objetivos de concentração em mesa oscilatória sejam atingidos faz-se necessário delimitar quais as variáveis são mais importantes no processo. Falconer (2003) fez uma análise comparativa entre os diversos equipamentos de concentração gravimétrica e se dedicou em elencar as variáveis de operação das mesas do tipo Wifley. Sunil et. al. (2011) avalia a performance na separação em mesa Wifley como dependentes das características da alimentação e, em especial aos parâmetros operacionais associados ao equipamento.

- Ângulo de inclinação do deque
- Amplitude do movimento oscilatório
- Frequência das oscilações
- Posição das caixas recuperadoras
- Taxa de alimentação
- Fluxo água de limpeza
- Altura dos riffles

Wills (2006) aponta a forte relação interdependente entre as variáveis operacionais. As diversas variáveis operacionais mostram sua interdependência quando se avalia os seus efeitos na estratificação das partículas no leito e no transporte do material sobre o deque. Sampaio e Tavares (2005) relata que a otimização das variáveis para a

estratificação do leito normalmente é incompatível com a otimização das variáveis para o transporte do material. Assim quando se planeja uma condição que promova o transporte adequado do material na mesa não pode ser as condições que dificultam a estratificação do material.

2.6.1 Inclinação lateral e longitudinal do deque

Os efeitos das inclinações, sejam na lateral ou na longitudinal, têm efeito maior quando se observa a velocidade de transporte do material. A inclinação longitudinal é definida como a inclinação paralela ao movimento do deque, e a inclinação lateral é a inclinação na direção de descarga do produto denso, ou inclinação perpendicular ao movimento do deque.

Sampaio e Tavares (2005) aponta que inclinações maiores acarretam em uma maior descarga de material ao produto leve e que pequenas inclinações laterais e longitudinais aumentam a descarga do material mais denso. A importância da inclinação ótima e adequada refere-se àquela na qual ocorre uma boa distribuição da alimentação sobre o deque. Analisando que uma maior inclinação conduz para uma maior descarga podemos entender que o seu maior valor se traduz em um aumento da capacidade de alimentação e na diminuição da água de lavagem. Andery (1980) explica que o efeito positivo no aumento de capacidade pode acarretar na diminuição da precisão de separação. Assim Sampaio e Tavares (2005) recomenda que as maiores inclinações devam ser utilizadas para uma separação primária (desbaste) e menores inclinações para as etapas de limpeza do concentrado prévio.

Legorreta-garcía (2010) estudou a utilização de mesa oscilatória na recuperação de areias com caulim variando a inclinação em 4,5°, 8° e 11,5°. Os seus resultados confirmaram menores recuperações de material pesado no ângulo de 11,5°. Tal baixa na recuperação foi analisado pela não retenção do material entre os riffles ocasionando o seu rápido carreamento pelo filme líquido descendente. Os resultados analíticos mostraram menores concentrações de Fe₂O₃ e TiO₂ para o ângulo de 11,5° enquanto os maiores teores dos elementos metálicos foram obtidos para a inclinação de 8°. A confirmação de menores recuperações de minerais denso foi confirmada por Legorreta-garcía (2010) com a utilização de fluorescência de raio x.

Borges (2015) estudou a concentração de hematita de quartzo com as inclinações de 1°, 3° e 5°. Para os baixos valores de inclinações de 1° e 3° obteve-se baixas

recuperações metalúrgicas enquanto uma recuperação metalúrgica de 93% foi obtida para a maior inclinação.

Shahram Shariati (2015) estudou uma rota para concentração de fosfato ($d= 3,2$) em matriz com quartzo ($d= 2,65$) e calcita ($d=2,7$) após preparação em fornos de calcinação e solubilização da cal em água. Os resultados obtidos foram promissores resultando na produção de um concentrado com teor de 30,77 % de P_2O_5 e recuperação em massa de 63,2%. Para os ensaios as condições de otimização da mesa foram ângulo de inclinação de 10° , fluxo de água em 10 litros por minuto, fração granulométrica abaixo de 100 micrômetros e água de limpeza de 10 litros por minuto.

2.6.2 Amplitude e frequência de oscilações

Um dos mecanismos de grande importância para a movimentação longitudinal e estratificação das partículas é a amplitude e a frequência das oscilações.

Andery (1980) destaca como o mecanismo de vibração das mesas deve ser produzido. A mesa deve iniciar sua oscilação com um movimento que parta suavemente na direção de descarga do concentrado terminando abruptamente, para promover o escorregamento da partícula na referida direção. Conclui-se que o retorno do impulso deve iniciar rapidamente para haver um recuo da superfície sob as partículas, e terminar suavemente.

A frequência e o curso de oscilação da mesa devem ser ajustados de acordo com a granulometria da alimentação. Para material fino utiliza-se alta frequência e pequena amplitude e para material grosso, baixa frequência e grande amplitude. A frequência varia de 150 a 290 ciclos por minuto enquanto que a amplitude varia de 0,25 a 1,25 polegadas (ANDERY, 1980).

Outra recomendação citada por Wills (2006) é a utilização de dois estágios de recuperação em mesas. O primeiro estágio denominado de desbaste no qual a preocupação é a alta taxa de processamento deverá ser utilizada alta amplitude. Enquanto que no segundo estágio denominado de limpeza é indicado pequenas amplitudes.

2.6.3 Concentração de sólidos

A polpa que alimentará a mesa oscilatória precisa ser suficiente fluida para permitir que o leito possa ter uma estratificação eficiente e a segregação quando for

promovida a sua dilatação. Falconer (2003) cita que muitas plantas de processamento têm utilizado porcentagens de sólidos tipicamente da ordem de 40%, porém este valor depende do tipo e tamanho de partícula que se está concentrado.

Sampaio e Tavares (2005) aponta valores diferenciados de porcentagens de sólidos em função do material que se está concentrando. Geralmente a porcentagem de sólido é da ordem de 25% em peso, não ultrapassando 35% para minérios e variando de 35% a 40% para carvão.

A consequência imediata da utilização de uma baixa porcentagem de sólido é a grande possibilidade das partículas finas se direcionarem para o produto leve enquanto que uma alta porcentagem de sólido pode prejudicar a separação, já que dificulta a estratificação do leito (SAMPAIO E TAVARES, 2005).

2.6.4. Vazão da água de lavagem

A concentração em mesas está envolvida com a segregação que ocorre pela movimentação das partículas em um filme líquido. Este filme líquido tem a função de garantir que as partículas sejam cobertas para que uma suficiente mobilidade ocorra.

Sampaio e Tavares (2005) afirma um aumento de vazão propicia uma melhor condição para o transporte das partículas leves em função do aumento da velocidade do fluido. Porém há um certo prejuízo na separação dos produtos, visto que grande parte do material pode se concentrar em faixas mais estreitas.

Borges (2015) obteve boas interpretações ao comparar testes de concentração em mesa variando a vazão da água de diluição em 80 litros por horas e 58 litros por hora. Os ensaios com maiores vazões de água de limpeza propiciaram uma recuperação metalúrgica de 77% e recuperação em massa de 40% com teor de hematita no concentrado pesado de 65%. Entretanto, estes bons resultados não foram verificados nos ensaios com baixa vazão de água de diluição, onde foram alcançadas baixas recuperações metalúrgicas em torno de 24%. Ilustrativamente pode-se notar que este resultado negativo se deve ao fato de muito material acumulado na região central da mesa, conforme Figura 87.



Figura 18 - Ensaio com baixas vazões de água de limpeza na concentração de hematita

Fonte: Borges, 2015

Diferentemente foram os trabalhos de Legorreta-García (2010) em que se avaliou o efeito na recuperação de hematita e rutilo com vazões de 3, 6 e 9 litros por minuto. Os resultados demonstraram baixas porcentagens em peso dos minerais pesados com recuperações de 25%, 19% e 10% para as vazões de 3, 6 e 9 litros por minuto, respectivamente.

2.6.5 Taxa de alimentação

Quando se pretende avaliar a capacidade de processamento de uma mesa oscilatória precisa ser considerado fatores como a área do deque, a taxa de separação de leves e pesados, e a taxa de remoção do material separado do deque. Relacionado a este fator de velocidade de separação está o critério de concentração que é a razão das densidades do sólido e líquido. Quanto maior for o critério de concentração e o tamanho da partícula mais rápida será a separação e maior será a capacidade da mesa (SAMPAIO E TAVARES, 2005). Assim fundamental importância deve ser dada na delimitação da taxa de alimentação, pois um valor elevado resultará em baixa precisão de separação e contaminação do produto leve com partículas finas densas.

Borges (2015) avaliou o resultado na recuperação metalúrgica de duas distintas taxas de alimentação na mesa oscilatória, com valores de 31 e 105 kg por hora. Os valores obtidos mostraram baixas recuperações mássica (9,93%) e baixas recuperações metalúrgicas (19,30%) para grandes taxas de alimentação. O que se constatou foi um sobrecarregamento da mesa com grande acúmulo de material na região central e pouco material no concentrado de pesados.

2.6.6 Tamanho e forma das partículas

Segundo Wills (2006) as mesas concentradoras, em função da otimização das variáveis operacionais, permitem que se possa separar materiais em amplos intervalos de tamanhos. Sampaio e Tavares (2005) e Mular et. al., (2002) complementam que as restrições físicas do tempo de sedimentação de partículas ultrafinas continuam a ser o grande problema. Com a otimização das variáveis pode se chegar a conseguir boas concentrações em mesas em faixas excepcionais da ordem de até 15 micrometros.

Mitchell (1997) observou a aplicação efetiva da mesa oscilatória na recuperação de partículas finas com granulometria em torno de 20 micrômetros, afirmando a concentração gravimétrica como uma alternativa ao uso de mercúrio em operações de garimpagem.

Desta forma, o limite inferior ao qual se consegue aplicação de métodos gravimétricos acabam sendo definidos pelo tamanho de partícula abaixo do qual as mesmas são mantidas essencialmente em suspensão, sendo arrastadas junto à água de lavagem.

Na separação de alimentações mais grossas, a taxa de alimentação, a vazão da água de lavagem, a altura dos riffles e a amplitude dos golpes devem ser maiores, enquanto a frequência ótima de oscilação é mais baixa. Já no beneficiamento de partículas mais finas, a vazão de água de lavagem, a altura dos riffles e a amplitude dos golpes são mais baixas (ANDERY, 1980).

Mular et. al. (2002) afirma a essencialidade de preparação e adequação do tamanho de alimentação para os equipamentos gravíticos. De fato, equipamentos como as mesas concentradoras exigem uma taxa de alimentação com faixa granulométrica bastante delimitada. Sampaio e Tavares (2005) corrobora que, embora as mesas concentradoras trabalhem com materiais em intervalos amplos de tamanhos, a separação de partículas em todo o intervalo não pode ser realizada com sucesso em uma única etapa.

Isto se deve ao fato que o ajuste ótimo das variáveis operacionais varia significativamente com o tamanho de partícula. Assim para que se consiga garantir uma operação ótima em mesas, é necessário que a alimentação seja classificada em diferentes faixas de tamanhos.

Outro fator ligado à movimentação longitudinal nas partículas entre os deques é a forma da partícula que exerce influência importante na separação. Partículas de formato tabular se aderem mais facilmente à superfície da mesa, tendendo a concentrar ao produto denso. (SAMPAIO, 2007)

2.7 PLANEJAMENTO FATORIAL

Em trabalhos de investigação, muitas vezes somos levados a tomar decisões baseadas em observações do fenômeno que se está estudando. Temos que decidir se um novo método que está sendo proposto é melhor do que métodos já utilizados. Temos que escolher entre um conjunto de alternativas quais devem continuar ou quais devem ser desprezadas e assim por diante. Para tomar tais decisões, necessitamos estabelecer critérios. Para isso surgem as técnicas estatísticas como um suporte na tomada de decisão. É através do uso de técnicas estatísticas que buscamos tirar conclusões de experiências e fatos novos em nossos processos do dia-a-dia (ANJOS, 2005).

Um processo ao qual estamos desejando estudar pode ser esquematizado conforme o modelo da Figura 19. Para esta simulação $x_1; x_2 \dots x_p$, representam as variáveis de entrada controláveis. Este processo para Montgomery (2009) pode ser visualizado como uma combinação de máquinas, métodos, pessoas e outros recursos que transformam entrada (geralmente materiais) em saída, que tem uma ou mais variáveis respostas. As variáveis de entrada não controláveis $z_1; z_2 \dots z_q$ são características experimentais não controladas, seja por desconhecimento da existência delas ou pelo alto custo para controlá-las, tais variáveis constituem o erro experimental.

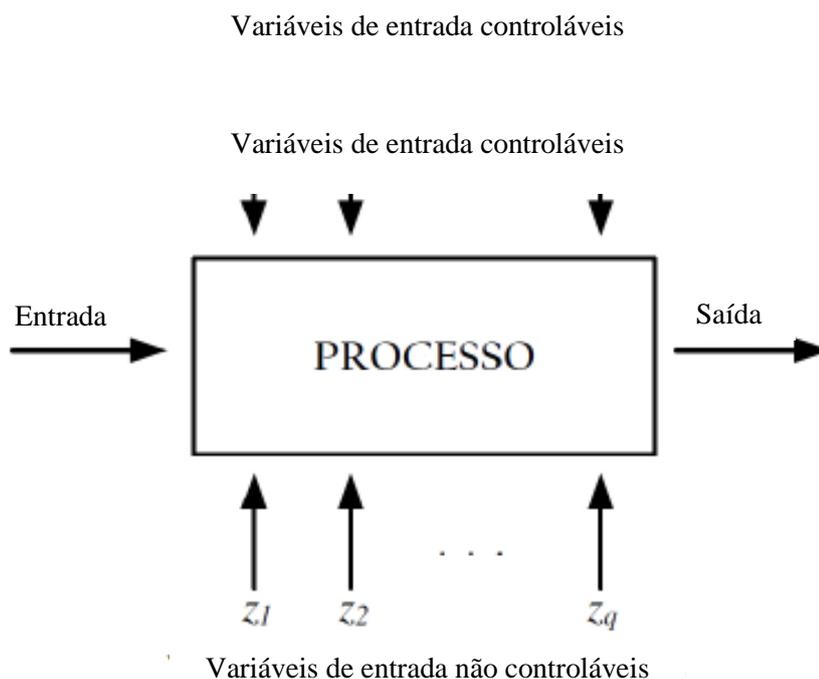


Figura 19 - Representação de um modelo geral de processo.

Fonte: Montgomery, 2009

É importante notar que uma variável de entrada é considerada controlável se os valores que ela assumir, denominados níveis, podem ser determinados antes do início dos testes. As variáveis de entrada controláveis que são de interesse em serem investigadas pelo pesquisador, geralmente, são denominadas de fatores, e as combinações possíveis entre os níveis dos fatores são chamadas de tratamento (BARROS NETO, 2001)

É importante notar que nem todos os fatores afetam o desempenho da mesma maneira. Alguns podem ter fortes influências, outros podem nem ter efeito na variável resposta (ANTONY, 2003).

Na estatística experimental, o planejamento de experimentos estatísticos refere-se ao processo de realizar um experimento, de tal forma que, os dados obtidos possam ser analisados por meio de métodos estatísticos, e levem a conclusões válidas (MONTGOMERY, 2009).

Calado e Montgomery (2003) enfatiza a importância dos planejamentos fatoriais pela possibilidade de determinar as variáveis que exercem maior influência no desempenho do processo, tendo como resultados práticos:

a) a redução da variação do processo e melhor concordância entre os valores nominais obtidos e os valores pretendidos;

- b) diminuição do custo operacional;
- c) redução do tempo gasto no processo;
- d) melhoria no rendimento do processo.

Esta metodologia adotada para se conhecer os efeitos das variáveis é baseada em princípios estatísticos e possui como objetivo maior extrair de um determinado sistema ao qual se deseja estudar, a maior quantidade de informação útil com a realização mínima de experimentos. A execução deste planejamento experimental para Calado e Montgomery (2003) tem como principal vantagem a possibilidade de combinar todas as variáveis em todos os níveis, podendo assim determinar a influência de uma ou mais variáveis sobre uma outra variável de interesse.

As respostas obtidas a partir dos ensaios em um planejamento experimental são as variáveis de saída do sistema, na qual, há interesse, e que serão - ou não - afetadas por modificações provocadas nos fatores. Assim complementa Barros Neto (2001) que dependendo do problema investigado, pode-se ter várias respostas de interesse, e que em algumas situações as mesmas precisam ser consideradas simultaneamente. Genericamente podemos entender que um certo número de fatores, F_1, F_2, \dots, F_k , atuando sobre o sistema em estudo, produz as respostas R_1, R_2, \dots, R_j .

Simplificadamente, quando se deseja estudar o efeito de um fator sobre a resposta é preciso fazê-lo variar e observar o resultado dessa variação. Isso obviamente implica na realização de ensaios em pelo menos dois níveis desse fator. Um planejamento em que todas as variáveis são estudadas em apenas dois níveis é, portanto, o mais simples de todos eles. Havendo k fatores, isto é, k variáveis controladas pelo experimentador, o planejamento de dois níveis irá requerer a realização de $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ensaios diferentes, sendo chamado por isso de planejamento fatorial 2^k (BOX et. al., 1978).

Quando determinado estudo envolve uma grande quantidade de variáveis ou fatores Montgomery (1991) sugere que o melhor seria fazer uma triagem, para decidir quais são os fatores que merecem um estudo mais aprofundado.

A importância ao planejamento fatorial nesta dissertação pode ser melhor entendida ao estudarmos os resultados obtidos nos trabalhos de Sunil (2011). No seu trabalho foi desenvolvido um modelo empírico que conseguiu descrever os resultados dos ensaios em mesas oscilatórias a partir de um planejamento fatorial com três níveis. Os dados obtidos descreveram com precisão o efeito dos três parâmetros operacionais e suas relações interativas para a recuperação de cromita usando a mesa do tipo Wilfley. Os

modelos foram ainda utilizados para otimizar os parâmetros que poderiam maximizar o grau de recuperação do Cr_2O_3 na fração concentrada.

Assim torna-se necessário a realização de planejamentos experimentais, que de certa forma são simples de executar, e que neste contexto fornece boas informações e conclusões preliminares em determinado estudo. Posteriormente, estes estudos podem ser ampliados para formar um planejamento mais sofisticado. Button (2001) analisa isto de forma positiva já que é no planejamento mais aprimorado que se busca conhecer melhor e de forma minuciosa a relação entre a resposta e os fatores importantes.

Galdaméz (2002) ressalta um outro motivo para se estudar e aplicar planejamento fatorial no contexto do beneficiamento de minérios. Em tais processos existem vários fatores e níveis de regulagens, que influenciam as características de qualidade dos concentrados obtidos e um problema comum encontrado ao realizar experimentos como instrumento para se analisar o estudo simultâneo e poder acompanhar o efeito desses fatores com diferentes níveis de regulagens.

2.7.1 Planejamento fatorial 2^3

Para esse tipo de planejamento queremos saber qual a resposta final da interação de três fatores que variam em dois níveis. Na linguagem estatística, dizemos que estamos interessados em descobrir como a resposta dependerá dos três fatores investigados. Com isso o planejamento fatorial completo passará a necessitar da realização de $2^3 = 8$ ensaios.

Após definirmos os níveis em que os fatores variarão segue para a montagem de uma tabela com a listagem dessas combinações, que é chamada de matriz de planejamento.

Em experimentos fatoriais 2^k , a construção de contrastes mutuamente ortogonais relativos aos efeitos principais e de interações pode ser realizada através de uma tabela de sinais positivos e negativos. Exemplo de uma matriz de planejamento é apresentada na Tabela 1, juntamente com as respostas obtidas com experimentos realizados em duplicata.

A matriz de planejamento lista os ensaios na ordem padrão. Todas as colunas começam com o nível inferior (-) e depois os sinais vão se alternando. Um a um na primeira coluna, - + - +..., depois dois a dois, - - + +..., e finalmente quatro sinais negativos e quatro positivos na última coluna (BARROS NETO, 2001).

Tabela 1 - Representação do desenvolvimento de um planejamento fatorial 2³

Nº Teste	Fatores de Controle			Ordem testes	Resposta 1 (Y_i)	Resposta 2 (Y_{ii})
	A	B	C			
1	-1	-1	-1	6	Y_1	Y_9
2	+1	-1	-1	8	Y_2	Y_{10}
3	-1	+1	-1	1	Y_3	Y_{11}
4	+1	+1	-1	2	Y_4	Y_{12}
5	-1	-1	+1	5	Y_5	Y_{13}
6	+1	-1	+1	3	Y_6	Y_{14}
7	-1	+1	+1	4	Y_7	Y_{15}
8	+1	+1	+1	7	Y_8	Y_{16}

Com o intuito de exemplificar a construção de uma tabela de sinais positivos e negativos, vamos continuar considerando um experimento em esquema fatorial 2³. A tabela de sinais pode ser inicialmente construída como na Tabela 1, e completada através dos itens seguintes até obter a Tabela 2.

- As colunas referentes aos efeitos de interação são obtidas pela multiplicação (linha por linha) das colunas de efeitos principais correspondentes;
- Acrescentar uma última coluna com as médias dos tratamentos.

A partir da matriz de planejamento podemos formar a tabela de coeficientes de contraste, multiplicando um a um os sinais das colunas apropriadas para obter as novas colunas correspondendo às interações. Teremos então os três efeitos principais A, B e C; três interações de dois fatores, AB, AC e BC e uma interação de três fatores, ABC.

Tabela 2 - Matriz de contraste planejamento fatorial 2³

MÉDIA	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	\bar{Y}_i
+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	\bar{Y}_1
+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	\bar{Y}_2
+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	\bar{Y}_3
+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	\bar{Y}_4
+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	\bar{Y}_5
+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	\bar{Y}_6
+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	\bar{Y}_7
+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	\bar{Y}_8

Os contrastes mutuamente ortogonais referentes aos efeitos principais e de interações, são obtidos pelo quociente do somatório dos elementos resultante da multiplicação (linha por linha) da coluna de cada efeito fatorial pela coluna de médias, pela metade da quantidade de médias consideradas no contraste.

Nas subseções seguintes serão apresentados para um experimento fatorial 2³, considerado anteriormente, a metodologia para obtenção dos contrastes mutuamente ortogonais referentes aos efeitos principais e de interações.

2.7.1.1 Cálculo dos efeitos principais e de interações

A Tabela 2 contém todos os sinais necessários para os cálculos dos efeitos. O divisor para a média é 8 e 4 para cada um dos efeitos. Empregando os sinais apropriados como coeficientes das respostas médias observadas em Y_i e em seguida aplicando os divisores, calculamos os sete efeitos e a média global. Para cada cálculo são utilizadas todas as observações. Galdaméz (2002) simplificadamente, apresenta o procedimento para o cálculo dos efeitos das variáveis. O cálculo consiste em multiplicar os resultados da coluna Y_i pelos valores ± 1 associados a coluna X_i de uma matriz experimental

correspondente ao efeito principal que se deseja estimar. Em seguida, estes valores obtidos devem ser somados e divididos pela metade do número de ensaios realizados.

Retornando à Tabela 2, observa-se que todas as colunas, exceto a primeira, têm quatro sinais positivos e quatro sinais negativos. Qualquer efeito, portanto, pode ser interpretado como a diferença entre duas médias, cada uma das quais contendo metade das observações. Assim, nosso experimento fatorial 2^3 , fornece os seguintes efeitos principais e interações.

$$\text{Efeito } A = \frac{1}{4}(-Y_1 + Y_2 - Y_3 + Y_4 - Y_5 + Y_6 - Y_7 + Y_8)$$

$$\text{Efeito } B = \frac{1}{4}(-Y_1 - Y_2 + Y_3 + Y_4 - Y_5 - Y_6 + Y_7 + Y_8)$$

$$\text{Efeito } C = \frac{1}{4}(-Y_1 - Y_2 - Y_3 - Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7 + Y_8)$$

$$\text{Efeito } AB = \frac{1}{4}(+Y_1 - Y_2 - Y_3 + Y_4 + Y_5 - Y_6 - Y_7 + Y_8)$$

$$\text{Efeito } AC = \frac{1}{4}(+Y_1 - Y_2 + Y_3 - Y_4 - Y_5 + Y_6 - Y_7 + Y_8)$$

$$\text{Efeito } BC = \frac{1}{4}(+Y_1 + Y_2 - Y_3 - Y_4 - Y_5 - Y_6 + Y_7 + Y_8)$$

$$\text{Efeito } ABC = \frac{1}{4}(-Y_1 + Y_2 + Y_3 - Y_4 + Y_5 - Y_6 - Y_7 + Y_8)$$

E por fim, a média dos ensaios é dado por:

$$\text{Média} = \frac{1}{8}(+Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7 + Y_8)$$

2.7.1.2 Estimativa de erro

Para que o erro seja estimado, as condições dos ensaios devem ser feitas em duplicatas e de forma aleatória. Desta maneira calcula-se a variância em cada observação individual e depois tira-se a média do somatório das variâncias individuais. A equação 27 nos permite calcular a estimativa conjunta da variância a partir das observações individuais em cada ensaio.

$$\text{Variância agrupada}^2 = s^2 = \frac{\sum d_i^2}{2N} \quad (27)$$

Onde d_i é a diferença entre as duas observações correspondentes ao i -ésimo ensaio.

Cada um dos efeitos calculados é uma combinação linear de oito valores de respostas médias com coeficientes iguais a $+1/4$ ou $-1/4$. Admitindo que os ensaios ocorram com aleatoriedade e autenticidade nas repetições correspondendo, significando uma mesma variância populacional. Admitindo que, cada um dos oito valores da combinação por sua vez é a média de dois outros, porque os ensaios foram feitos em duplicata, podemos aplicar a Equação 28 com coeficiente $= 1/8$, para calcular a variância de um efeito em um planejamento 2^3 .

O cálculo da variância dos efeitos é dado por:

$$\text{Var}(\text{efeitos}) = \frac{\text{Variância agrupada}^2}{2} \times \left(\frac{8}{N}\right) \quad (28)$$

Onde N é o número total de experimentos, $N = 16$, levando em consideração os ensaios duplicados.

O erro padrão de um efeito é a raiz quadrada desse valor, sendo calculado pela equação 29.

$$\text{Erro} = \sqrt{\text{Variância}(\text{efeitos})} \quad (29)$$

2.7.1.3 Interpretação dos resultados

Na análise de variância de experimentos fatoriais, quando o efeito de alguma interação é significativo, recomenda-se estudar o desdobramento dessa interação, ou seja, analisar o efeito de um dos fatores dentro dos níveis dos demais. A representação gráfica dos efeitos principais e das interações precisam ser definidos e a sua interpretação é dada, conforme descrito por Montgomery (1991).

- O sinal (\pm) indica a direção do efeito, isto é, se a resposta aumenta ou decresce com a variação do nível de (-1) para (+1);
- A magnitude indica a intensidade do efeito.

Bortoline (2012) cita uma situação hipotética em que haja interesse em discorrer minuciosamente o efeito da interação AC, que se mostrou significativa no planejamento experimental. Nesta situação as fontes de variações A e AC podem ser decompostas em duas novas fontes de variações: A: C- e A: C+. A primeira refere-se ao efeito do fator A dentro do nível baixo do fator C, e a segunda ao efeito do fator A dentro do nível alto do fator C. Alternativamente a desdobramento da interação AC em efeitos do fator A dentro dos níveis do fator C, as fontes de variações C e AC também podem ser decompostas em duas novas fontes de variações: C: A- e C: A+, referente aos efeitos do fator C dentro dos níveis do fator A.

Na literatura há diferentes métodos para se avaliar efeitos e coeficientes significativos; entre os mais usados destaca-se a análise de variância (ANOVA), o gráfico de probabilidade normal (distribuição normal) e a comparação de efeitos com uma medida independente da variabilidade (MONTGOMERY, 1991)

Após a análise matemática dos dados e com os testes planejados corretamente é possível rejeitar ou aceitar as hipóteses formuladas para os ensaios executados mediante a inferência estatística. Para decidir se os efeitos calculados são significativamente diferentes de zero podemos empregar um teste t (student) usando as tabelas estatísticas existentes (BUSSAB e MORETIN, 1985).

Para os planejamentos fatoriais 2^3 executados em nível usualmente de 95% de confiança empregados o valor de t correspondente a 8 graus de liberdade é 2,306. A interpretação é que só serão estatisticamente significativos os efeitos cujo valor absoluto excederem o valor $2,306 \times Erro$, sendo *Erro*, o calculado na equação 29.

2.7.1.4 Análise por meio de gráficos normais

A análise por meio de gráficos normais é uma técnica alternativa para tentarmos distinguir, nos resultados de um planejamento, os valores que correspondem realmente aos efeitos daqueles outros valores que são devidos apenas ao ruído. Seu funcionamento se baseia na noção de probabilidade cumulativa (BARROS NETO et.al, 2001). Seguindo a mesma discussão Nóbrega (2010) afirma que no caso dos fatoriais replicados, os gráficos de probabilidade podem ser usados para complementar as análises feitas pela ANOVA, bem como na análise dos resíduos, afim de verificar a presença de algum valor discrepante.

Uma variável aleatória x distribuída normalmente obedece à equação 30 cuja representação gráfica é uma curva em forma de sino, conforme apresentado na Figura 20 (a).

$$f(x)dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (30)$$

Ao considerarmos um valor numérico específico para a variável x e chamemos esse valor de x_1 , a área da cauda à esquerda de x_1 é a probabilidade acumulada do valor x_1 . Essa área, que corresponde à probabilidade de se observar um valor de x menor ou igual a x_1 aumenta continuamente à medida que x se desloca para a direita, tendendo para 1, que é o valor da área total sob a curva, quando x tende para $+\infty$, conforme apresentado na Figura 20 (b). Como se ver, um gráfico da probabilidade cumulativa numa distribuição normal é uma curva monotonicamente crescente, em forma de S que vai (de forma assintótica) de zero à esquerda para 1 à direita (BARROS NETO et. al., 2001).

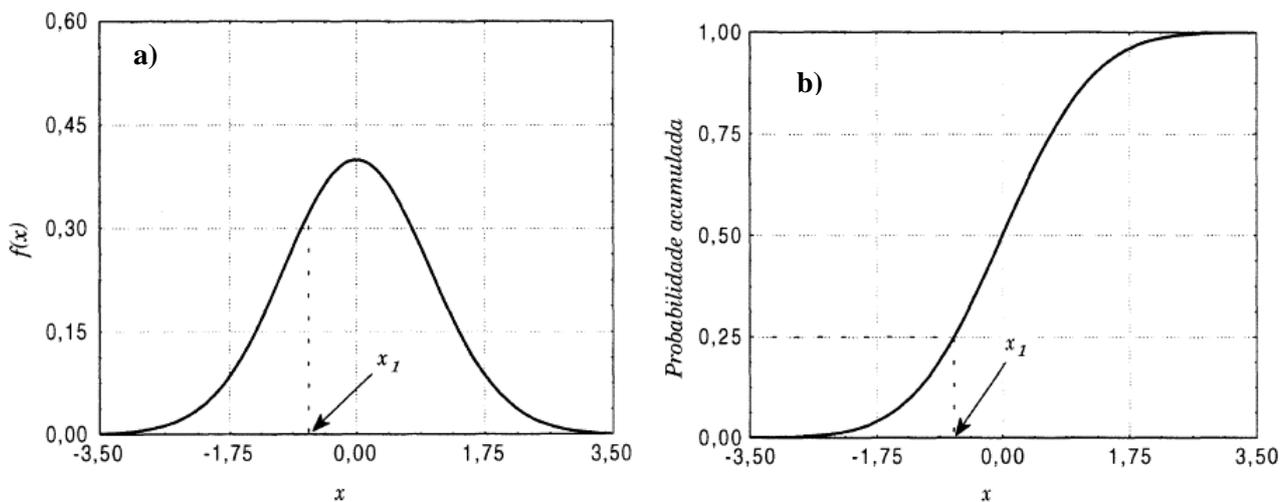


Figura 20 - (a) gráfico de densidade de probabilidade numa distribuição normal padronizada. A probabilidade acumulada correspondente a um valor x_1 é a área sob a curva à esquerda de x_1 (b) probabilidade acumulada na escala cartesiana usual

Fonte: Adaptado de Barros Neto (2001)

Por sua vez a curva da Figura 20 (b) pode ser transformada numa reta, por meio de uma modificação na escala do eixo das ordenadas. Essa modificação consiste em expandir a escala simetricamente em torno do ponto representando 0,5 (isto é, 50% de probabilidade acumulada), de modo a "esticar" as duas pontas do S conforme apresentado na Figura 21.

A representação de uma curva cuja função é logarítmica em um papel logarítmico será representada por uma reta. Assim, da mesma forma quando x se distribui normalmente para um gráfico de probabilidade acumulada será representada por uma sigmoide para uma escala cartesiana comum, em uma escala logarítmica passará a ser uma reta se fizermos a escala vertical correspondente à da Figura 21. Observe que as probabilidades acumuladas 0 e 1, que correspondem respectivamente a $-\infty$ e $+\infty$ sobre o eixo das abscissas, a rigor não podem ser representadas nesse gráfico, porque a escala é finita (BARROS NETO et.al., 2001).

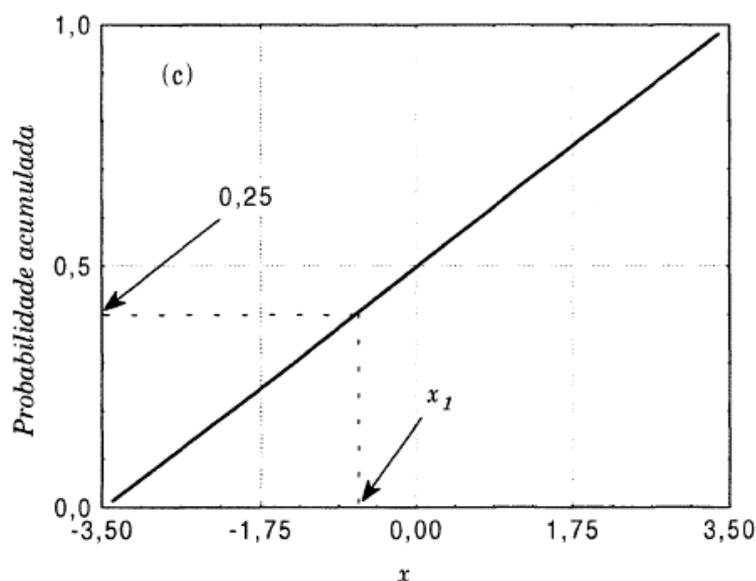


Figura 21 - Gráfico da figura 20 (b) num eixo de probabilidade normal. Note que a escala de probabilidade acumulada não é mais linear

Fonte: Adaptado de Barros Neto (2001)

Os gráficos normais também nos ajudam a avaliar a qualidade de um modelo qualquer, seja ele relacionado com um planejamento fatorial ou não. Um modelo bem ajustado aos fatos, qualquer que seja a sua natureza, deve ser capaz de representar toda a informação sistemática contida nos dados. Os resíduos deixados por ele devem representar apenas a parte aleatória, isto é, o ruído embutido nas medições. O aspecto do gráfico normal desses resíduos deve ser compatível com o que esperaríamos de uma amostra aleatória extraída de uma distribuição normal de média zero. Ou seja, devem aproximar-se de uma reta passando pelo ponto $(x, Z) = (0, 0)$, como na região central da Figura 21.

3 METODOLOGIA

3.1 AMOSTRAGEM

A amostragem é a primeira etapa a ser executada quando se pretende estudar um material. O processo de coleta de amostras compreendeu primeiramente uma visita à empresa siderúrgica a fim de se determinar a melhor forma de proceder a amostragem da escória.

A técnica da amostragem é um processo de seleção e inferência, objetivando tirar conclusões de um todo a partir do conhecimento de uma parte, a realização inadequada dessa etapa pode prejudicar todas as análises seguintes com a amostra (GÓES et al, 2004).

A escória é descartada do FEA em uma baia, onde fica resfriando até que seja retirada antes do vazamento da escória da próxima corrida. Quando retirada, é depositada do lado de fora do galpão, aguardando para ser transportada até o pátio de rejeitos. A coleta foi realizada nas pilhas dispostas no pátio de rejeito, imediatamente após o descarregamento. Desta forma, conseguem-se obter amostras referentes de cada corrida, sem estar misturada com material de outra corrida.

A amostra de escória de FeSiMn foi coletada de diversos pontos das pilhas de rejeito da Empresa de Ferro Ligas Marabá (FERMAR) ao longo das corridas de duas semanas totalizando uma amostra primária de 40 kg.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para caracterização das amostras, foram realizados os procedimentos analíticos descritos a seguir.

A amostra global foi encaminhada para o laboratório de tratamento de minérios da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), onde foi cominuída em britadores de mandíbulas com obtenção de material 100% passante em granulometria de 2 mm e então homogeneizada e quarteada pelo emprego de pilhas cônicas e pilhas alongadas (Figura 22) obtendo-se assim uma amostra representativa ao qual foi submetida aos ensaios subsequentes.



Figura 22 - Pilha alongada

3.2.1 Classificação granulométrica

Para a realização do processo de beneficiamento, através da mesa oscilatória, uma alíquota foi britada em britadores de rolos e moinhos de discos até a obtenção de duas faixas granulométricas, cuja razão de redução está próxima de 2,0.

As frações granulométricas conduzidas para os ensaios foram: granulometria grossa 100% inferior a 60# e superior a 115#; e granulometria fina 100% inferior a 115# e superior a 250#.

Para a realização da classificação granulométrica do material foram utilizadas peneiras e um “agitador mecânico de peneiras”. A escória foi peneirada nas peneiras abertura série Tyler de 35#, 48#, 60#, 100#, 150#, 200#, 250#, 270# e 325#.

3.2.2 Composição química

Devido ao interesse deste trabalho na concentração de liga de FeSiMn, visando o seu reaproveitamento foi conduzida análises químicas na alimentação e no concentrado.

A amostra foi preparada (homogeneizada/quarteada) e sua granulometria foi reduzida a um tamanho de partícula inferior a 74 μm por meio de almofariz e pistilo.

Uma porção de amostra foi secada em estufa a 110°C. Uma porção da amostra seca foi levada a uma mufla a 1000°C por 2 horas para determinação da perda ao fogo. Uma outra porção de amostra seca foi prensada em cápsulas de alumínio com 30 toneladas de força. As pastilhas prensadas foram analisadas em espectrômetro de fluorescência de raio-X Rigaku Modelo ZsX Primus II, equipado com tubo de Rh e 7 cristais analisadores. Os resultados da varredura semiquantitativa foram recalculados para 100% após a incorporação do valor da perda ao fogo. Os resultados foram expressos em peso %.

3.2.3 Cálculo da recuperação metalúrgica

Um processo de beneficiamento qualquer deve ter os seus balanços de massa e metalúrgico usuais (CHAVES, 2002). Como procedimento adotado para os cálculos neste trabalho faz-se descrição na equação abaixo.

$$\text{Recuperação metalúrgica} = \text{Rec. Massa} \times \frac{\text{Teor concentrado}}{\text{Teor da alimentação}} \quad (31)$$

3.2.4 Análise microscópica

As amostras preparadas e observadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) Modelo: TM 3000 da fabricante HITACHI acoplado com um sistema de microanálise química por dispersão de energia (EDS) e detectores de elétrons secundários com feixe eletrônico de 15 Kv em modo de alto vácuo foi utilizado para visualizar a distribuição das partículas metálicas, por meio de amostra em grãos em fita de carbono.

3.2.5 Determinação da densidade

Foram separadas manualmente 1 g de partículas de liga e 1 g de escória para estimativa da densidade. Foi empregada a técnica de determinação de densidade por picnometria utilizando um picnômetro de 50 mililitros. A densidade calculada foi de 3.1 g/cm³ para a escória e 6.2 g/cm³ para a liga metálica.

3.2.6 Análise qualitativa do grau de liberação

A análise em lupa binocular foi realizada somente sob o aspecto investigativo com o intuito de se observar a liberação das partículas metálicas por intervalo granulométrico. As análises qualitativas em lupa binocular foram realizadas nas frações retidas no peneiramento de +28#, +35#, +48#, +65#, +100# e +150#. Os procedimentos para as análises foram:

- Transferiu-se uma pequena massa da fração retida nas peneiras de 28#, 35#, 48#, 65#, 100#, 150# para o vidro de relógio, utilizando-se uma espátula.
- Colocou-se o vidro de relógio no local adequado, na lupa binocular com aumento de 10X, e ajustou-se o foco.
- Separou-se aleatoriamente 80 partículas, avaliando-se em cada uma delas o grau de liberação.

3.3 ENSAIOS NA MESA OSCILATÓRIA

Uma alíquota de aproximadamente 40 kg da amostra foi cominuída em circuito fechado por meio de britadores de mandíbula, britadores de rolos e moinho de discos até obtenção de partículas com granulometria adequada aos ensaios.

Os ensaios foram realizados com amostras de 250 gramas em uma mesa oscilatória do tipo Wilfley conforme ilustrado na Figura 23.

A amostra de escória foi descarregada manualmente e diretamente na mesa oscilatória de maneira constante.

Para as condições de operação da mesa foram levadas em consideração o diâmetro das partículas, a amplitude e pulsação do motor e a taxa de água sobre a mesa, através de ensaios exploratórios que objetivaram analisar as melhores condições de operação da mesa.

Os parâmetros operacionais, definidos foram o fluxo de água 60 L/hora, frequência de 360 RPM e taxa de alimentação 1000 gramas por hora. Em seguida foram realizados os ensaios com a coleta de duas amostras denominadas de concentrado e de leve (rejeito). Os resultados obtidos no processo de concentração da liga de FeSiMn presente na escória foram expressos pela recuperação em massa, recuperação metalúrgica e pelo teor do concentrado.



Figura 23 - Mesa oscilatória utilizada para os ensaios

3.4 PLANEJAMENTO FATORIAL

No desenvolvimento do estudo em questão um planejamento experimental foi utilizado para auxiliar na investigação inicial nos testes de concentração na mesa oscilatória.

Para os ensaios deste estudo foi utilizado um planejamento fatorial 2^3 para prever as influências das variáveis em níveis (mínimos e máximos) com os outros possíveis fatores fixados. A tabela 3 mostra as variáveis e níveis utilizados nos testes.

Tabela 3 - Variáveis e níveis dos testes de concentração na mesa oscilatória

VARIÁVEIS	NÍVEIS	
Granulometria	Fina -115# +250# (-)	Grossa - 60# + 115# (+)
Amplitude	12 mm (-)	14 mm (+)
Inclinação	2° (-)	4° (+)

As variáveis e os níveis estudados tiveram com ponto de referência os ensaios exploratórios avaliados preliminarmente e os estudos de Reis (2005), que avaliou a

concentração de minério de manganês em mesa oscilatória variando a inclinação em 3° e 5°, nos trabalhos de Kusno (2011) que verificou maiores recuperações em massa e maiores teores em manganês nas faixas de passante em 40 mesh e retido em 100 mesh e nos trabalhos desenvolvidos por Legorreta-garcía (2010) que analisou a distribuição de partículas de Fe₂O₃ e TiO₂ em amostras de caulim nas frequências de 220 rpm, 270 rpm e 320 rpm.

A matriz de planejamento fatorial 2³ (tabela 4) mostra foi construída com todas as combinações possíveis dos testes. O cálculo dos efeitos foi realizado com auxílio de uma tabela de coeficientes de contraste. Nessa tabela é adicionada uma coluna com sinais positivos (M) para o cálculo da média dos ensaios e as outras colunas são obtidas na multiplicação dos fatores, elemento a elemento, e substituída pelos sinais algébricos. Assim foram 3 efeitos principais, 3 efeitos das interações de dois fatores e um efeito das interações de 3 fatores.

Para calcular os efeitos, foi escolhida a coluna apropriada e aplicada seus sinais às respostas correspondentes, realizada a soma algébrica e finalmente dividimos o resultado por 4. A primeira coluna, que só contém sinais positivos, serve para calcular a média global de todos os ensaios, e nesse caso o divisor é 8. Os ensaios foram realizados em duplicata e em ordem aleatória.

Tabela 4 - Planejamento fatorial dos testes de concentração na mesa oscilatória

Fatores	(-)	(+)	
1: Granulometria	-115# +250#	-60# +115#	
2: Amplitude	12 mm	14 mm	
3: Inclinação	2°	4°	
Testes	1	2	3
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA

A distribuição granulométrica da amostra, conforme Figura 24, foi realizada por peneiramento a seco com agitador de peneiras. Graficamente, podemos avaliar que 75% das partículas encontram-se abaixo de 300 micrômetros. Observa-se, ainda, que 22% das partículas da amostra encontram-se abaixo de 100 micrômetros.

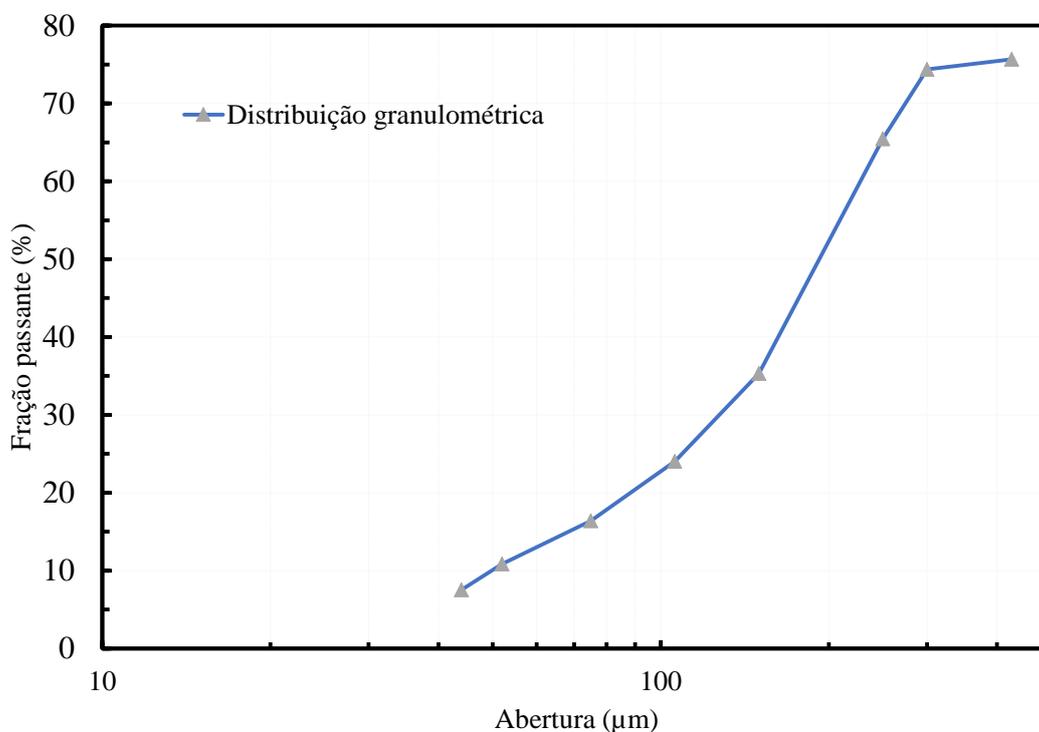


Figura 24 - Gráfico distribuição granulométrica da amostra global

Apesar da distribuição granulométrica, obtida após a moagem, exibir uma ampla faixa de tamanho de partículas os ensaios para o planejamento fatorial foram realizados em tamanhos fixados, considerando uma razão de redução de 2 entre o menor e o maior tamanho de abertura de peneira.

4.1.1 Análise óptica da amostra

A liberação da liga metálica em diversas faixas granulométricas foi estudada qualitativamente por meio de lupa binocular. Os estudos indicados pelas imagens logo abaixo indicam que um elevado grau de liberação é obtido mesmo em faixas granulométricas grosseiras, onde os métodos físicos convencionais de concentração podem ser aplicados.

A análise óptica em lupa binocular buscou observar a distribuição das fases de partículas metálicas presentes na alimentação e no produto obtido com os ensaios de beneficiamento gravimétrico.

A Figura 25 (a, b) trata-se de uma partícula de liga metálica em granulometria grosseira de 417 micrômetros incrustada em uma massa vítrea provavelmente silicatada. A partir desta imagem pode-se observar a necessidade de uma maior cominuição para uma liberação eficaz da fase metálica.

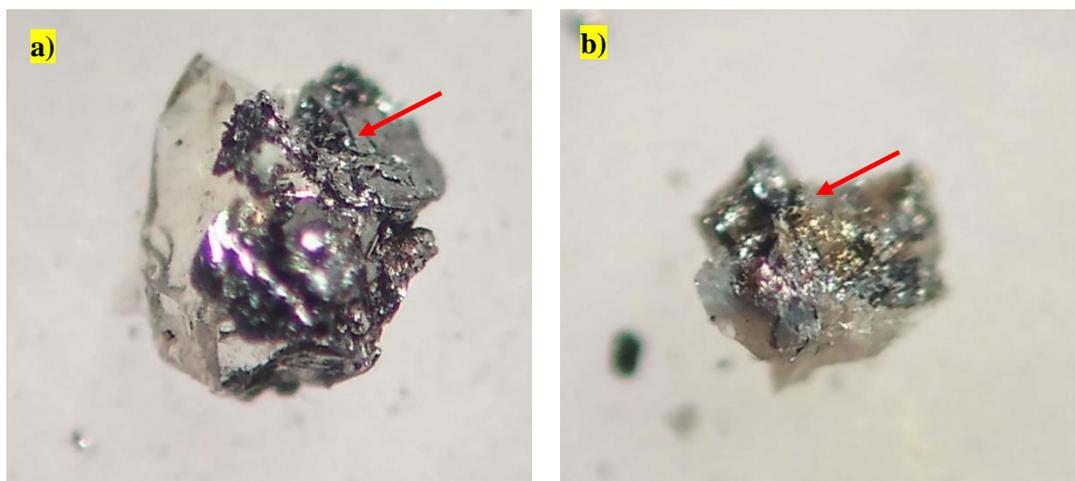


Figura 25 - Partícula de liga metálica incrustada na matriz vítrea

A sequência de figuras abaixo, obtidas com aumento de 20 X, permite observar a distribuição da fase de liga metálica do produto obtido após o processo de cominuição em moinhos de rolos na faixa granulométrica de 295 micrômetros. A Figura 26 (a, b, c) indica a liberação total das partículas na faixa granulométrica citada. Pode-se notar que a cominuição com 100% abaixo de 250 micrômetros possui um ótimo potencial de liberação das partículas metálicas, devido ao tamanho médio das mesmas. Desta forma a análise por lupa binocular com aumento de 20X permitiu observar que a liberação das partículas metálicas (indicadas pelas setas) foi eficaz.

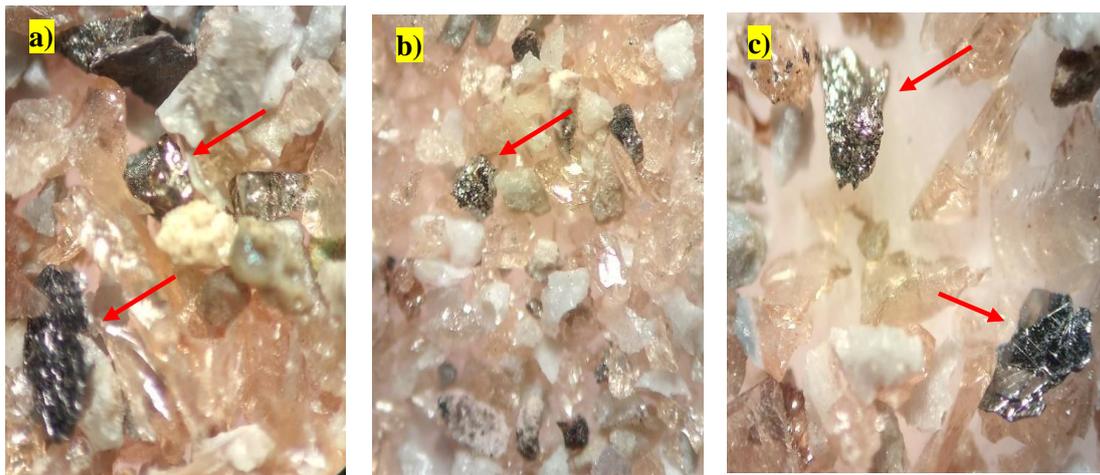


Figura 26 - Partícula de liga metálica liberada no tamanho de 295 micrômetro

A Figura 27 (a, b, c) permite identificar as partículas de liga de FeSiMn pelas características do brilho metálico e tonalidade escura com forma mais globular enquanto que as partículas de escória apresentam forma bastante irregular e textura porosa. Constatou-se a existência de partículas metálicas em todas as frações analisadas com predominância nas frações mais finas.

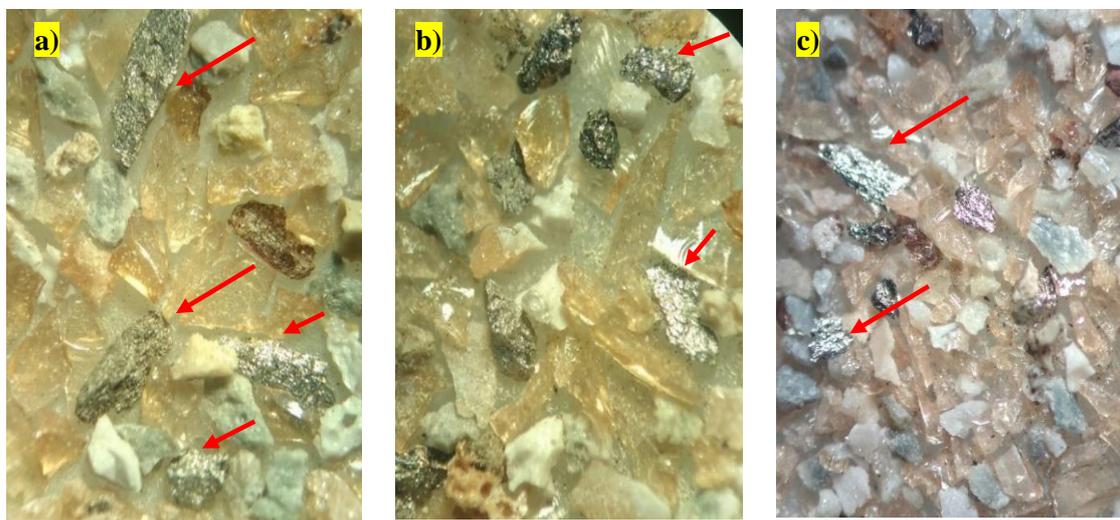


Figura 27 - Imagens lupa binocular exibindo forma das partículas

Os resultados obtidos em um dos testes para o concentrado pesado e para o produto leve pode ser observado na Figura 28 (a, b), respectivamente. Observando as imagens verifica-se grande concentração de liga metálica sob a forma de cristais de coloração prateada e o brilho metálico característico. A Figura 28 (b) trata-se produto leve gerado após o beneficiamento gravimétrico. Em função da tonalidade mais clara verifica-

se que a fase metálica em sua grande parte foi retirada após a concentração em mesa oscilatória.

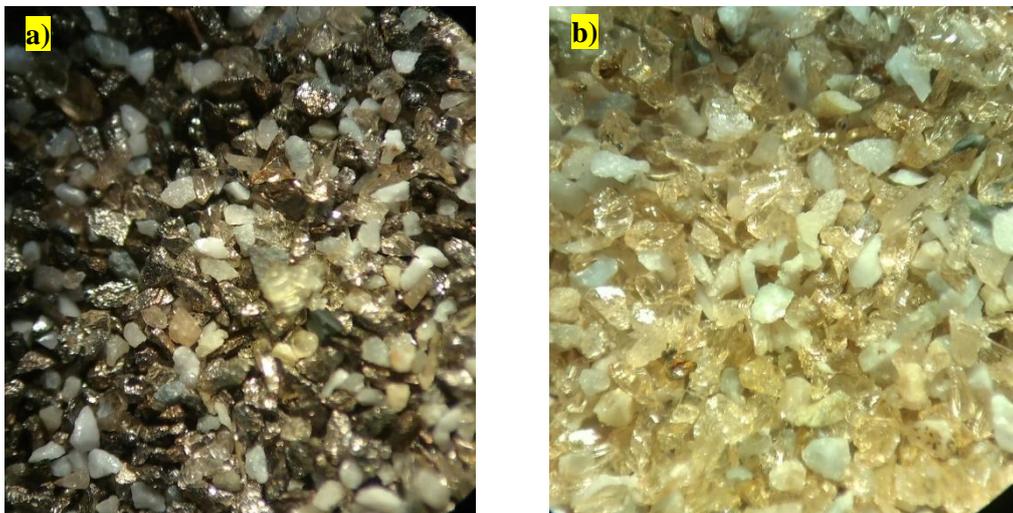
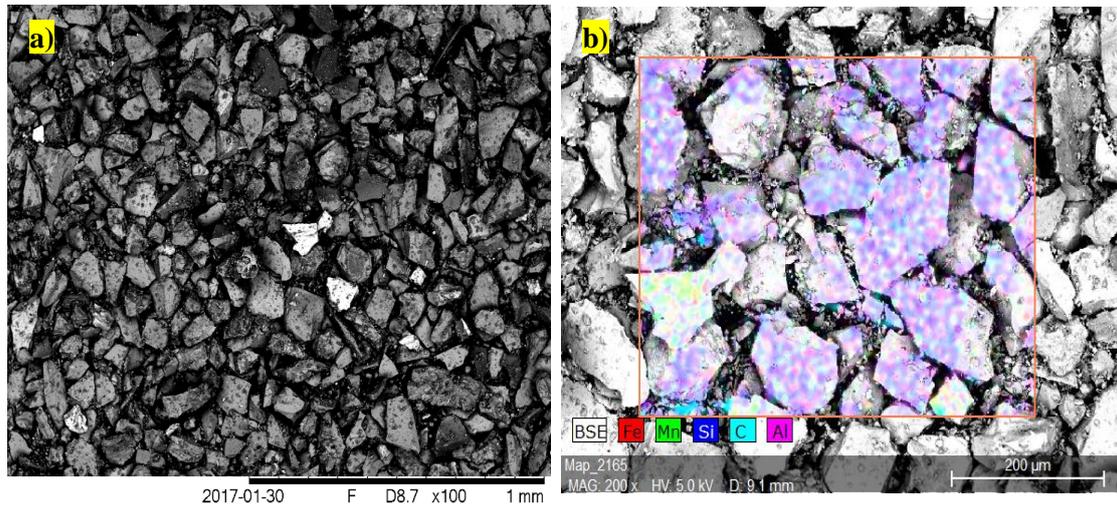


Figura 28 - Imagens lupa binocular produto concentrado pesado (a) e produto leve (b).

4.1.2 Análise microscopia eletrônica de varredura

As micrografias obtidas para a escória referente à alimentação são apresentadas nas Figuras 29 e 30. A liga metálica apresenta-se na forma de partículas angulosas e de dimensões variadas, devido à natureza de sua cristalização durante seu resfriamento na baia. A Figura 29 (a) obtida a partir do detector de elétrons secundários permite identificar a morfologia das partículas. A imagem obtida em tons de cinza permite identificar elementos de maior densidade através dos pontos mais claros. A Figura 29 (b) capturada após a análise química de toda a superfície da imagem permite confirmar, no canto inferior esquerdo, em tonalidade verde-amarelo a partícula com alto teor de ferro e manganês.



DEMEC \ CTG

Figura 29 - Micrografia mostrando em detalhe a distribuição das partículas de liga metálica obtida por imagens de elétrons secundários (a) e mapeamento distribuição química (b)

A partícula centralizada na micrografia Figura 30 (a) foi analisada por energia dispersiva de raios-X e o respectivo espectro é apresentado na (b). A partícula caracterizada pela análise pontual com o EDX trata-se provavelmente de uma liga de FeSiMn, já que contém os mesmos elementos que compõem a liga metálica, porém o pico correspondente ao alumínio de média intensidade trata-se de óxido de alumínio em granulometria menor disposto externamente na superfície da partícula. A presença de Al_2O_3 é marcante na liga metálica, especialmente quando este elemento se encontra em teores acima de 5%.

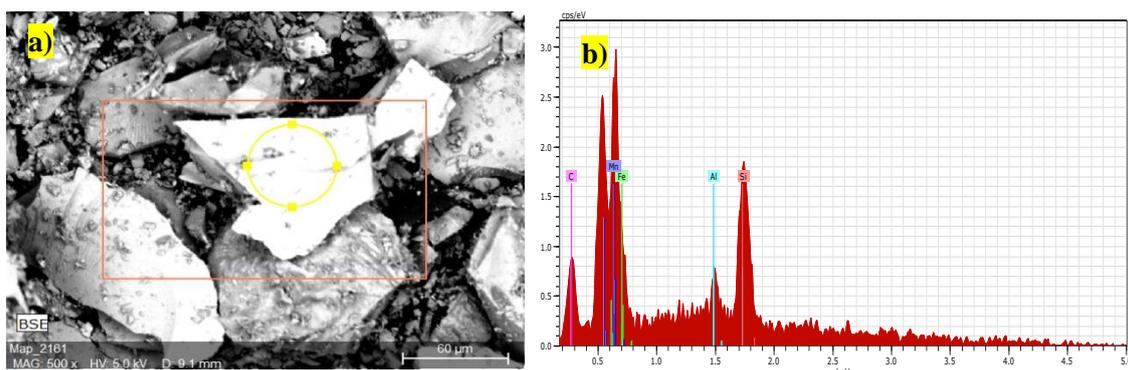


Figura 30 - Imagem de elétrons secundários (a) e espectro de EDX de uma análise pontual na partícula de liga metálica (b)

4.1.3 Análise química

Os teores dosados e distribuição dos elementos para as alimentações de granulometria fina e grossa estão expostos na tabela 5. Com base nos dados verifica-se que os teores de Fe variam de 2,53% em peso na amostra de granulometria fina para 1,91% na amostra de granulometria grossa. As amostras analisadas apresentam muitos contaminantes, sendo a alumina, óxido de bário e de potássio, os únicos presentes em quantidades apreciáveis. O elevado teor de sílica e de óxido de manganês estar associado à presença na matriz vítrea e na liga metálica. O manganês, apesar de constituir o elemento principal na liga metálica, devido às suas propriedades conferidas ao aço não pode ser utilizado como elemento identificador do teor de liga, tendo em vista seu alto teor proposital para controle da fluidez da escória do forno.

Tabela 5 - Análise química da alimentação por FRX

	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃ total	BaO
AL1Fina	0,07	9,45	22,34	0,02	4,33	1,12	53,05	2,53	5,37
AL2Grossa	0,06	9,63	22,73	0,01	4,42	1,1	52,68	1,91	5,64

4.2 ENSAIOS E PLANEJAMENTO FATORIAL

A tabela 6 exibe os resultados dos testes de concentração na mesa oscilatória, contendo dados sobre a recuperação média em massa do concentrado pesado e a recuperação metalúrgica.

Tabela 6 - Resultados dos testes de concentração em mesa oscilatória

Testes	A Granulometria (mesh)	B Inclinação (°)	C- Amplitude (mm)	Recuperação Mássica média (%)	Teor médio (%)
1	-115# +250# (Fina)	2	12	5,21%	17,93
2	-60# + 115# (Grossa)	2	12	2,81%	16,24
3	-115# +250# (Fina)	4	12	6,24%	12,88
4	-60# + 115# (Grossa)	4	12	4,91%	14,14
5	-115# +250# (Fina)	2	14	5,86%	17,17
6	-60# + 115# (Grossa)	2	14	5,93%	14,39
7	-115# +250# (Fina)	4	14	4,16%	10,10
8	-60# + 115# (Grossa)	4	14	3,06%	13,02

A partir dos dados da tabela 6 foi construído o gráfico da recuperação em massa versus teor do concentrado (figura 31). Observa-se que os ensaios 1 e 5 obtiveram elevados teores de ferro com altas taxas de recuperação em massa. De maneira contrária foi verificado nos ensaios 3 e 7 em que se obteve elevada recuperação em massa e baixo teor de concentrado. Tais ensaios serão melhores descrito no decorrer do trabalho.

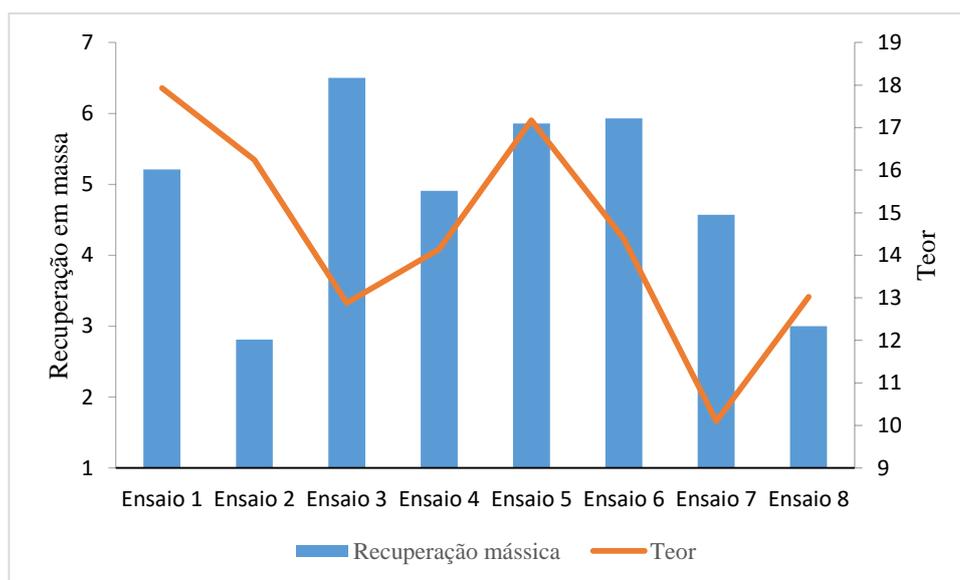


Figura 31 - Gráfico da recuperação em massa versus teor do concentrado

4.2.1 Análise dos efeitos e interações na recuperação mássica do concentrado

A tabela 7 apresenta a análise estatística da variância para os ensaios na mesa oscilatória para a resposta de recuperação mássica do concentrado pesado.

Tabela 7 - Análise da variância para a recuperação mássica

Número ensaios	Resposta das repetições		Médias	Variâncias	Efeitos	Tcalculado	
1	5,84	4,58	5,21	0,794	Média	4,8475	
2	2,94	2,68	2,81	0,034	A	-1,3725	0,68 SG
3	7,2	5,8	6,50	0,980	B	-0,02	0,68 NSG
4	5,46	4,36	4,91	0,605	C	-0,2075	0,68 NSG
5	6,06	5,66	5,86	0,080	AB	-0,2075	0,68 NSG
6	5,76	6,1	5,93	0,058	AC	0,6225	0,68 NSG
7	4,3	4,83	4,57	0,140	BC	-1,905	0,68 SG
8	2,83	3,16	3,00	0,054	ABC	-0,6125	0,68 NSG
Teste t (8 graus de liberdade)		2,306	Variância das observações individuais	0,343			
			Variância dos efeitos	0,086			
			Erro dos efeitos	0,292900367			

Observe que os resultados dos ensaios que apresentam os efeitos ou coeficientes significativos aparecem com a simbologia em letras vermelhas (SG). As diferenças nos resultados para os ensaios em duplicata podem ocorrer e, certamente, tais diferenças são devidas aos fatores que não puderam ser melhor controlados, como a taxa de alimentação que foi conduzida manualmente, em função da inexistência de alimentador vibratório. Os graus de liberdade são apresentados nas planilhas entre parênteses junto ao t de Student.

O gráfico da Figura 32 apresenta o resultado dos efeitos principais e das interações obtidas para a análise na recuperação mássica de fração do concentrado pesado. De acordo com os resultados apresentados, a granulometria da amostra (A) e a interação de segunda ordem inclinação e amplitude (BxC) foram as variáveis que exerceram maiores influências na recuperação em massa.

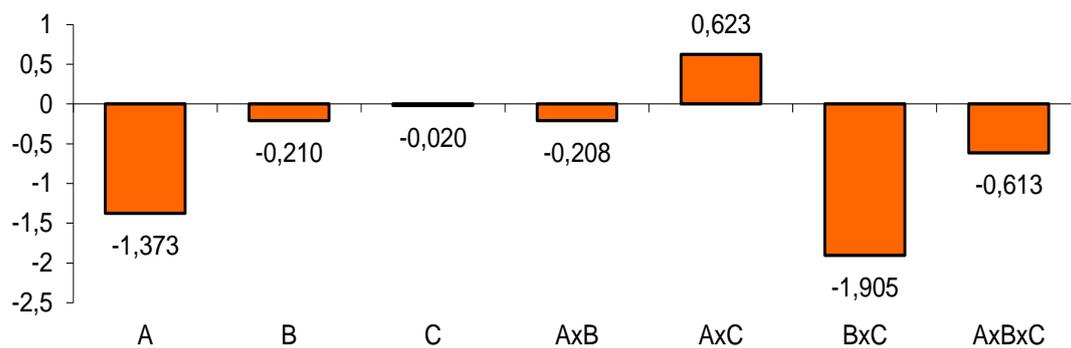


Figura 32 - Gráfico dos efeitos e interações sobre a recuperação mássica de concentrado pesado

O efeito principal da granulometria pode ser interpretado isoladamente, porque não há interação significativa desse fator com os outros. A interpretação é simples, quando a granulometria passa do nível inferior (-115# +250#) para o nível superior (-60# + 115#) ocorre uma diminuição média de cerca de 1,4% na recuperação mássica, e não há evidência de que essa diminuição dependa dos níveis das outras variáveis, na faixa experimental investigada.

O gráfico da Figura 33 exibe os valores dos efeitos traçados em um gráfico normal. Vemos imediatamente que os pontos que não se ajustam muito bem à uma reta que cruza a probabilidade acumulada de 50% sobre o ponto 0 do eixo das abscissas são os efeitos A e BC, sendo assim entendidos como efeitos significativos. Já os demais pontos representam "efeitos" sem nenhum significado físico.

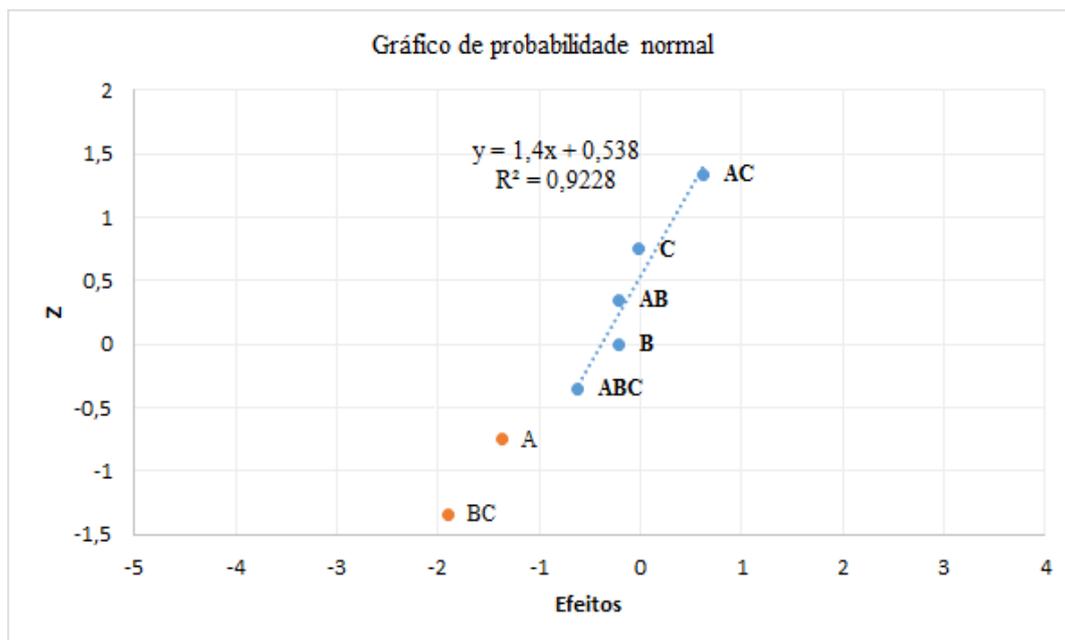


Figura 33 - Análise por gráfico normal dos valores dos efeitos e interações sobre a recuperação mássica. Só os efeitos A e BC parecem significativos.

Por meio da Figura 34 podemos entender o efeito da interação BxC (inclinação e amplitude) na recuperação em massa. O segmento B (-) corresponde às amostras que foram ensaiadas com inclinação do deque em 2°. E o segmento B (+) corresponde às amostras ensaiadas com inclinação em 4°.

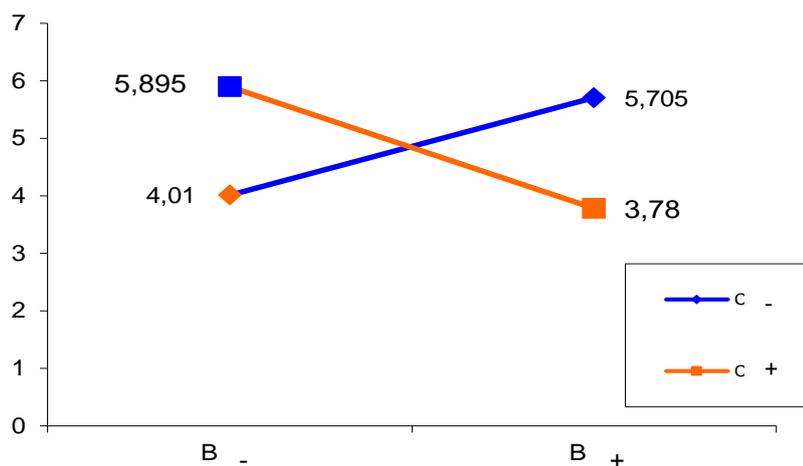


Figura 34 - Gráfico da relação entre os fatores BC.

A posição oblíqua entre os segmentos do gráfico nos permite dizer se a interação é grande ou pequena a ponto de ser desconsiderada. Neste caso, diversas são as posições relativas dos segmentos e a análise proceder-se-á de acordo com estas posições. O efeito do aumento da inclinação sobre a resposta é mostrado no eixo das ordenadas.

Desta maneira, no cruzamento B (-) com C (-) a recuperação mássica é 4,01 % enquanto que no cruzamento de B (-) com C (+), a recuperação mássica é de 5,89 %. Observe que há um aumento na recuperação mássica quando se aumenta a amplitude de 12 mm para 14 mm. A seguir passaremos a analisar as respostas médias para os ensaios individuais nas condições de interação citadas.

A Figura 35 ilustra o perfil de distribuição dos produtos concentrado e rejeito para os ensaios 1 e 5, que foram feitos com granulometria fina e inclinação em 2°. Para esta condição houve um aumento pouco significativo na recuperação mássica: de 5,21% para 5,86% ao variar a amplitude de 12 mm para 14 mm, respectivamente.



Figura 35 - Perfil do ensaio 1 com amplitude de 12 mm (a) e do ensaio 5 com amplitude de 14 mm (b)

A Figura 36 ilustra o perfil de distribuição dos produtos concentrado e rejeito para os ensaios 2 e 6, que foram feitos com granulometria grossa e inclinação de 2°. Para esta condição houve aumento significativo na recuperação mássica: de 2,81% para 5,93% ao mudar de uma amplitude de 12 mm para 14 mm.



Figura 36 - Perfil do ensaio 2 com amplitude 12 mm (a) e do ensaio 6 com amplitude de 14 mm (b)

Assim, os resultados obtidos corroboram com as informações apresentadas por Sampaio e Tavares (2005) que afirma o maior efeito da oscilação do deque sobre as partículas densas tanto grossas como finas. Desta forma ao aumentarmos a amplitude possibilitamos que as partículas mais grossas densas também fossem deslocadas para a região de coleta do concentrado pesado, aumentando assim a recuperação em massa e provavelmente. Ao analisarmos o teor dos ensaios observamos que há uma queda com o aumento da recuperação em massa, tal efeito decorre provavelmente do efeito oscilatório sobre as partículas finas leves as quais também foram deslocadas com as densas.

De forma análoga, a análise do cruzamento de B (+) com C (-), a recuperação mássica é de 5,70% e no cruzamento com C (+) a recuperação é de 3,78%. Veja que há uma queda na recuperação mássica quando se altera a amplitude de 12 mm para 14 mm.

A Figura 37 ilustra o perfil de distribuição dos produtos concentrado e rejeito para os ensaios 3 e 7, que foram feitos com granulometria fina e inclinação em 4°. Para esta condição houve diminuição na recuperação mássica: de 6,24% para 4,16% ao mudar de uma amplitude de 12 mm para 14 mm.



Figura 37 - Perfil do ensaio 3 com amplitude 12 mm (a) e do ensaio 7 com amplitude de 14 mm (b)

A Figura 38 ilustra o perfil de distribuição dos produtos concentrado e rejeito para os ensaios 4 e 8, que foram feitos com granulometria grossa e inclinação em 4° . Para esta condição houve diminuição na recuperação mássica: de 4,91% para 3,06% ao mudar de uma amplitude de 12 mm para 14 mm.



Figura 38 - Perfil do ensaio 4 com amplitude 12 mm (a) e do ensaio 8 com amplitude de 14 mm (b)

As maiores recuperações nos ensaios 5 e 6 com o aumento da amplitude na inclinação de 2° é resultado da maior segregação entre o produto concentrado e o rejeito, verificado pela ampla faixa de coleta do produto denso. A eficiente segregação pode ser entendida comparando a força resultante do movimento oscilatório e do filme de película de água. Nas inclinações inferiores o efeito do filme líquido é substancialmente menor, o que torna intenso a predominância da oscilação do deque sobre as partículas fina e grossas densas conforme afirmado por Sampaio e Tavares (2005).

As menores recuperações nos ensaios 7 e 8 com o aumento de amplitude na inclinação de 4° é resultado da ineficiente estratificação. Em uma inclinação mais acentuada o efeito do filme líquido tende a acentuar sobre as partículas provocando de forma mais rápida o seu movimento lateral na mesa. Em combinação com a elevação na amplitude as partículas não se distribuíram adequadamente para as posições inferiores da mesa, dificultando a sua devida coleta.

4.2.2 Análise dos efeitos e interações na recuperação metalúrgica

Como citado por Chaves (2002) é de grande valia nas operações de concentração em tratamento de minérios avaliar o grau de recuperação do metal contido. A definição da recuperação metalúrgica envolve conhecer o grau de distribuição do metal da alimentação com o metal no concentrado. Os fatores, então, que contribuem ou prejudicam na recuperação metalúrgica envolve a recuperação em massa e a própria razão entre o teor presente nas frações obtidas com os ensaios com o teor da respectiva alimentação. O gráfico da Figura 39 avalia para os ensaios a relação entre recuperação em massa e a recuperação metalúrgica. Cabe destacar os ensaios 5 e 6 que obtiveram boas recuperações metalúrgicas e em massa, enquanto o efeito contrário foi verificado nas condições do ensaio 2 e 8.

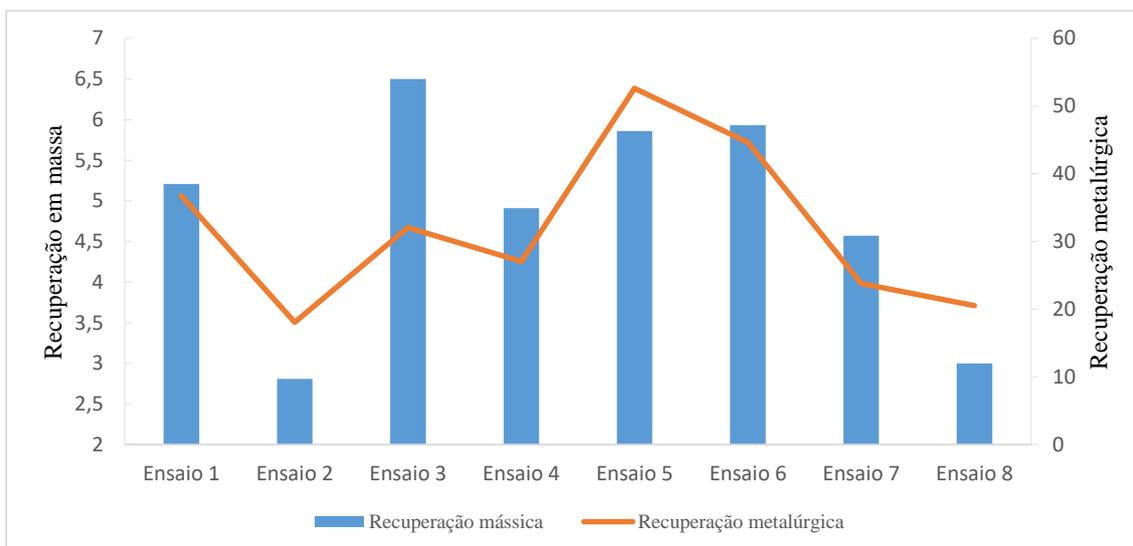


Figura 39 - Gráfico da recuperação em massa versus recuperação metalúrgica

Com ângulo de inclinação igual a 2° a recuperação de liga metálica (ensaios 1, 2, 5 e 6), para as duas faixas granulométricas testadas (finas e grossas), mostrou-se sempre maior (com exceção para o ensaio 2) onde houve baixa recuperação, enquanto que no ensaio oposto para o fator de inclinação com as mesmas condições de granulometria e amplitude houveram altas recuperações (ensaio 4).

Os valores das recuperações metalúrgicas chegaram a 52 e 44,66%, para os ensaios 5 e 6, respectivamente. Estes dados corroboram com os trabalhos realizados por Reis (2005) que estudou a recuperação de minérios de manganês em mesa oscilatória em ângulos de 3° e 5°. Os resultados obtidos foram de maior recuperação em todas as faixas granulométricas estudadas (global, + 0,074 mm e - 0,074 mm) para o ângulo de inclinação em 3°.

A baixa recuperação para o ensaio 2 se deu em função do estreitamento entre as faixas de concentrado e rejeito provocadas pela baixa aceleração longitudinal resultado da menor amplitude (12 mm).

A tabela 8 representa a análise estatística da variância para os ensaios na mesa oscilatória para a resposta da recuperação metalúrgica da liga metálica, com nível de confiança de 95%. As diferenças, notadamente nas respostas da duplicata nos ensaios 3 e 7 certamente é devido à taxa de alimentação que ocorreu manualmente.

Tabela 8 - Análise da variância para a recuperação metalúrgica

Número ensaios	Resposta das repetições		Médias	Variâncias	Efeitos	Tcalculado	
1	39,73	33,74	36,74	17,940	Média	31,941875	
2	19,21	16,89	18,05	2,691	A	-8,74625	4,92 SG
3	26,3	37,85	32,08	66,701	B	-12,14375	4,92 SG
4	26,78	27,35	27,07	0,162	C	6,92125	4,92 SG
5	53,27	52,01	52,64	0,794	AB	4,60125	4,92 NSG
6	44,9	44,36	44,63	0,146	AC	3,10125	4,92 NSG
7	28,05	19,57	23,81	35,955	BC	-14,32125	4,92 SG
8	17,29	23,77	20,53	20,995	ABC	-2,23625	4,92 NSG
Teste t (8 graus de liberdade)		2,306	Variância das observações individuais	18,173			
			Variância dos efeitos	4,543			
			Erro dos efeitos	2,131497053			

O gráfico da Figura 40 apresenta o resultado dos efeitos principais e das interações obtidas para a análise na recuperação metalúrgica. De acordo com os resultados apresentados, as três variáveis de primeira ordem (granulometria, inclinação e amplitude) e a interação amplitude e inclinação foram as variáveis que exerceram maiores influências na recuperação metalúrgica.

A análise da influência da granulometria e da inclinação do deque podem ser interpretadas em conjunto pois a mudança de um nível inferior para um nível superior gera uma resposta negativa na recuperação metalúrgica. Desta maneira, há uma perda de 8,7% ao variar de uma granulometria fina para uma granulometria grossa e uma perda de 12% ao aumentar a inclinação do deque de 2° para 4°. Interpretação oposta é feita para o fator de amplitude de oscilação, em que há uma resposta positiva de 7% ao variar de 12 mm para 14 mm.

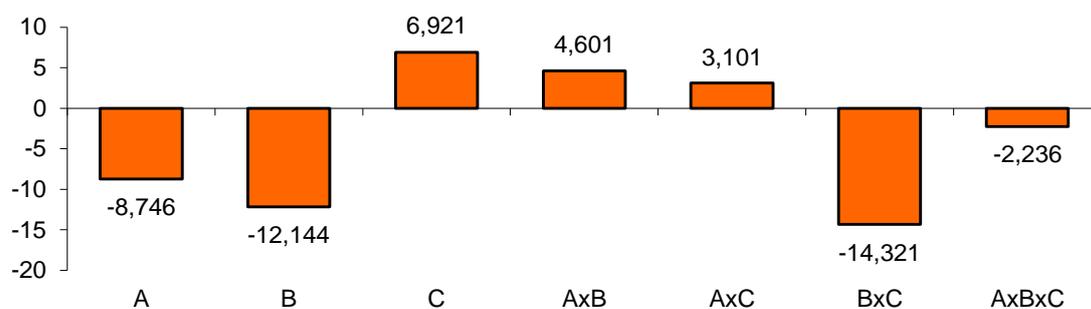


Figura 40 - Gráfico dos efeitos e interações sobre a recuperação metalúrgica

O gráfico da Figura 41 exibe os valores dos efeitos traçados em um gráfico normal. Observamos que os efeitos A, B, C e BC são os pontos que não se ajustam à uma reta e portanto são entendidos como efeitos significativos. Já os demais pontos representam "efeitos" sem nenhum significado físico.

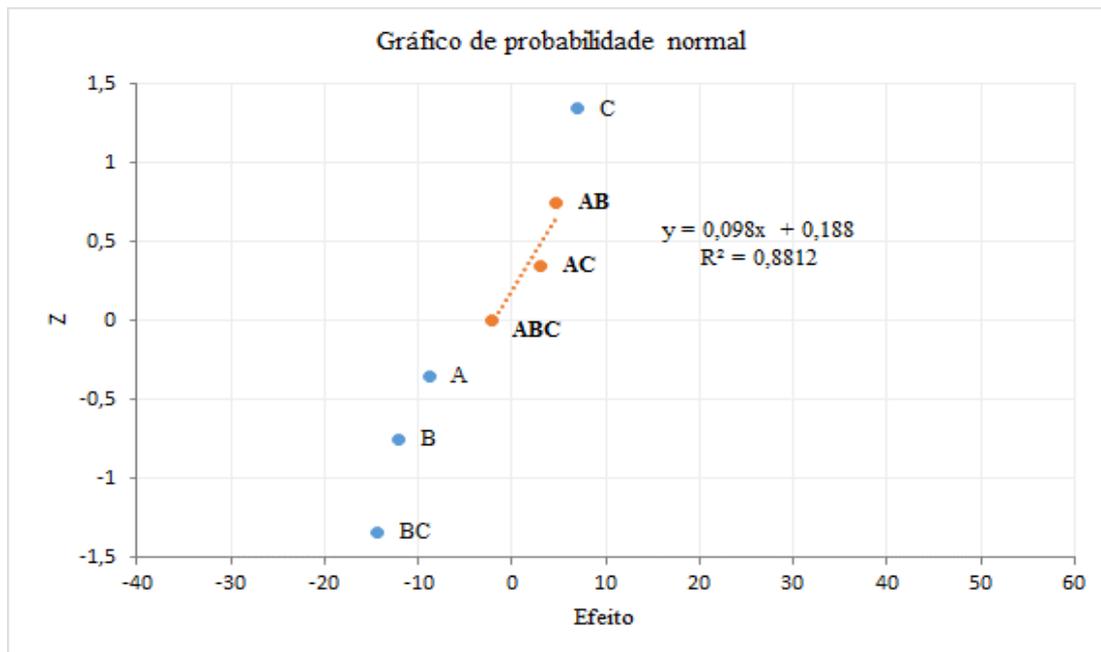


Figura 41 - Análise por gráfico normal dos valores dos efeitos e interações sobre a recuperação mássica. Só os efeitos AB, AC e ABC parecem não significativos.

A análise do efeito da granulometria sobre a recuperação metalúrgica pode ser avaliada comparando os ensaios 1 e 2 e os ensaios 7 e 8. A Figura 42 ilustra o perfil de distribuição na mesa oscilatória dos produtos concentrado e rejeito para os ensaios 1 e 2, que foram conduzidos com inclinação em 2° e amplitude de 12 mm. Para esta condição houve diminuição na recuperação metalúrgica: de 36,74% para 18,05 % ao mudar de granulometria fina para granulometria grossa.

De fato, o ensaio 1 foi promissor por obter uma boa recuperação em massa associado a um alto teor no concentrado enquanto o contrário ocorreu no ensaio 2 onde foi obtido baixa recuperação mássica e menor teor. Para os ensaios 7 e 8 foram obtidos resultados opostos entre recuperação em massa e teor de concentrado.



Figura 42 - Perfil de separação no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b) para as condições de granulometria fina e granulometria grossa

A análise do efeito da inclinação sobre a recuperação metalúrgica pode ser avaliada comparando os ensaios 1 e 3 e os ensaios 5 e 7. A Figura 43 ilustra o perfil de distribuição dos produtos concentrado e rejeito para os ensaios 5 e 7, que foram feitos com granulometria fina e amplitude de 14 mm. Para esta condição houve diminuição na recuperação metalúrgica: de 52,64% para 23,81 % ao variar de uma inclinação de 2° para 4°.

As observações mostram que a queda brusca na recuperação metalúrgica esteve ligada com a diferença de teor entre os ensaios associado com uma diferença mediana entre as recuperações em massa. Os maiores valores de recuperação metalúrgica, conforme será detalhado posteriormente, está ligado as menores velocidades de escorregamento das partículas densas nas inclinações em níveis inferiores.



Figura 43: Perfil de separação no ensaio 5 (a) e ensaio 7 (b) para as condições de inclinação 2° e 4°, respectivamente

A análise do efeito da amplitude sobre a recuperação metalúrgica pode ser avaliada comparando os ensaios 1 e 5 e os ensaios 4 e 8. A Figura 44 ilustra o perfil de distribuição dos produtos concentrado e rejeito para os ensaios 4 e 8, que foram feitos com granulometria grossa e inclinação em 4°. Para esta condição houve diminuição na recuperação metalúrgica: de 27,07% para 20,53 % ao variar de uma amplitude em 12 mm para 14 mm. Interessante destacar, que para os ensaios 1 e 5, em que ocorreram em granulometria fina e inclinação de 2°, o aumento da amplitude promove maior recuperação metalúrgica, de 36% para 52%, respectivamente.

As discussões acerca das diferenças na comparação dos ensaios 1 e 5 com os ensaios 4 e 8 nos permite concluir que em inclinações de menores e granulometrias finas as partículas densas são as últimas a sofrer o efeito do filme líquido, em contrapartida são as primeiras a sofrer efeito com o aumento do movimento oscilatório, justificando assim a boa recuperação metalúrgica no ensaio 5. De modo contrário utilizando maior inclinação o efeito no escorregamento é maior para as partículas grossas densas, quando comparadas com as finas densas, sendo o contrário no movimento oscilatório com menor efeito nas grossas densas do que nas finas densas. Em síntese a explanação acima obtida a partir da análise dos trabalhos de Burt (1984) permite compreender a menor recuperação metalúrgica para o ensaio 8.

Assim, a recuperação metalúrgica mais elevada foi promovida pela melhor distribuição das partículas sobre a mesa resultando em maior recuperação mássica (4,91%) com melhor teor (14,14%) para o ensaio 4, enquanto que o efeito contrário foi verificado no ensaio 8 ao qual obteve recuperação mássica de 3% com teor menor de 13%.



Figura 44: Perfil de separação no ensaio 4 (a) e ensaio 8 (b) para as condições de amplitude 12 mm e 14 mm, respectivamente

Em última análise cabe avaliar o efeito da interação BxC (Inclinação e amplitude) na recuperação metalúrgica mostrado na Figura 45. No cruzamento de B (-) com C (-) a recuperação metalúrgica é de 27 % e no cruzamento com C (+), a recuperação é de 48,6 %. Observe que há um aumento na recuperação metalúrgica quando se aumenta a amplitude de 12 mm para 14 mm para uma mesma inclinação de deque de 2°. A seguir é destacado os ensaios em que tais condições foram impostas.

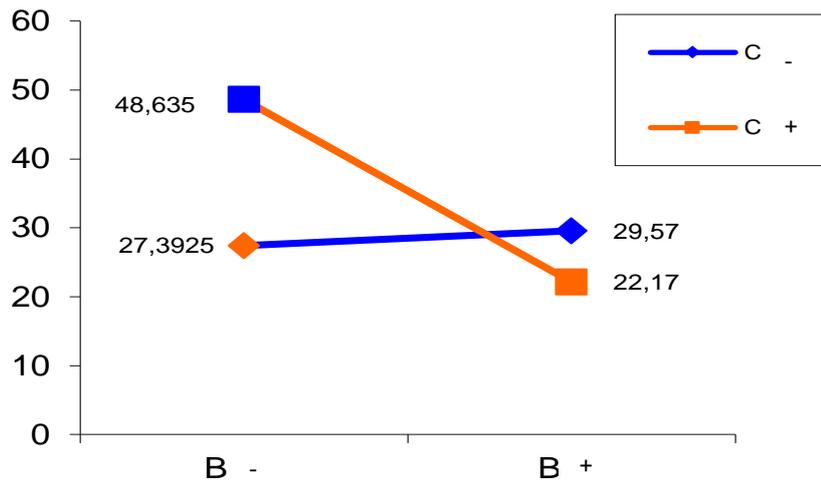


Figura 45: Gráfico da relação entre os fatores BC.

A Figura 46 permite observar o comportamento visual do material sobre o tabuleiro para os ensaios 1 e 5, que foram feitos com granulometria fina e inclinação em 2°. Para esta condição houve um aumento significativo na recuperação metalúrgica: de 36,74% para 52,64% ao variar a amplitude de 12 mm para 14 mm, respectivamente.



Figura 46: Perfil do ensaio 1 com amplitude de 12 mm (a) e do ensaio 5 com amplitude de 14 mm (b)

A Figura 47 ilustra o perfil de distribuição dos produtos concentrado e rejeito para os ensaios 2 e 6, que foram feitos com granulometria grossa e inclinação em 2° . Para esta condição houve aumento significativo na recuperação mássica: de 18,05% para 44,63% ao mudar de uma amplitude de 12 mm para 14 mm.



Figura 47: Perfil do ensaio 2 com amplitude 12 mm (a) e do ensaio 6 com amplitude de 14 mm (b)

De forma análoga, a análise do cruzamento de B (+) com C (-), a recuperação metalúrgica é de 29,57% e no cruzamento com C (+) a recuperação é de 22,17%. Veja que há uma queda na recuperação metalúrgica quando se altera a amplitude de 12 mm para 14 mm.

A Figura 48 ilustra o perfil de distribuição dos produtos concentrado e rejeito para os ensaios 3 e 7, que foram feitos com granulometria fina e inclinação em 4° . Para esta condição houve diminuição na recuperação metalúrgica: de 32,08% para 23,81% ao mudar de uma amplitude de 12 mm para 14 mm.



Figura 48: Perfil do ensaio 3 com amplitude 12 mm (a) e do ensaio 7 com amplitude de 14 mm (b)

A Figura 49 ilustra o perfil de distribuição dos produtos concentrado e rejeito para os ensaios 4 e 8, que foram feitos com granulometria grossa e também, em inclinação de 4°. Para esta condição houve diminuição na recuperação mássica: de 27,07% para 20,53% ao mudar de uma amplitude de 12 mm para 14 mm.



Figura 49: Perfil do ensaio 4 com amplitude 12 mm (a) e do ensaio 8 com amplitude de 14 mm (b)

Os resultados expressos na interação BxC conduz para o entendimento que em inclinações menores o aumento da amplitude de oscilação do deque gera um aumento na recuperação metalúrgica. O efeito contrário é observado para os ensaios na maior inclinação, na qual tem-se um efeito negativo na recuperação metalúrgica quando se aumenta a amplitude.

Sampaio e Tavares (2005) estudou os ângulos críticos para o escorregamento, no sentido lateral da mesa, em partículas de ouro ($d= 19 \text{ g/cm}^3$), quartzo ($d=2,65 \text{ g/cm}^3$), wolframita ($d= 7,5 \text{ g/cm}^3$) e carvão ($d=1,3 \text{ g/cm}^3$). Os dados obtidos permitiram afirmar que partículas densas requerem maior ângulo para o início do escorregamento quando comparadas com partículas leves. Considerando estas conclusões entende-se que nos ensaios para inclinações em 2° as partículas densas não sofreram grandes velocidades de escorregamento, ficando mais susceptíveis às forças de oscilação do deque, gerando melhor separação e estratificação entre produto denso e produto leve.

Avaliando as maiores inclinações entendemos que em 4° houve escorregamento significativo das partículas densas as quais pode ser confirmada pela faixa estreita na separação entre os dois produtos. Associando uma maior amplitude nestes ensaios percebe-se uma maior dificuldade de segregação, o que de maneira oposta não se observa na menor amplitude, onde grande parte da massa conseguiu-se distribuir mais internamente entre os rifles, o que fez resultar em melhor recuperação metalúrgica.

5 CONCLUSÕES

O processo de beneficiamento gravimétrico por mesa oscilatória se mostrou eficiente para a concentração da liga metálica de FeSiMn.

Ficou destacado que as três variáveis estudadas, a granulometria da alimentação, a inclinação e a amplitude são variáveis significativas na recuperação metalúrgica, ou seja, na partição do metal presente na alimentação e do metal presente no concentrado.

Ficou destacado que para a recuperação mássica a granulometria é a única variável significativa.

Ficou destacado que as variáveis inclinação e amplitude interagem entre si, de maneira a trazer efeitos sinérgicos na recuperação em massa e na recuperação metalúrgica. A avaliação desta interação de segunda ordem nos dar a informação que os melhores benefícios na recuperação da liga metálica com melhores taxas de operação na mesa se dão em condições de inclinação elevada com baixa amplitude de oscilação.

Analisando os dados de recuperação metalúrgica observamos que os ensaios mais promissores foram os 5 e 6 em que bons resultados foram dados tanto para granulometria grossa e fina em amplitudes de 14 mm e inclinação de 2°.

Assim, em linhas gerais, os resultados dos testes de concentração em mesa oscilatória do planejamento fatorial mostraram que a maior recuperação metalúrgica da liga de FeSiMn, ocorre de maneira mais significativa com a variável de inclinação em 2° e amplitudes mais elevadas. Pelo exposto, pode-se perceber que o planejamento fatorial não determina valores ótimos em uma única etapa, porém este procedimento indica satisfatoriamente o caminho a ser tomado para que se possa atingir o objetivo proposto.

Os cálculos dos efeitos do planejamento fatorial mostraram que os três efeitos principais (granulometria, inclinação e amplitude), e a interação de 2ª ordem entre a inclinação x amplitude são as variáveis significativas, comprovado pela análise do gráfico de distribuição normal, pois estão mais distantes da região central (zero no eixo das abscissas).

Através da análise por meio do gráfico normal, foi possível comprovar a distinção de quais efeitos são significativos no planejamento fatorial, e determinar a estimativa da variância conjunta (18,17) e a estimativa para o erro padrão de um efeito (2,13). Com um nível de 95% de confiança o valor de t com 8 graus de liberdade foi 2,306 e valor limite para significância de um efeito igual a 4,92.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos sugerem a realização dos seguintes estudos futuros:

- Estudar a influência da variável da forma de alimentação por meio de alimentador vibratório e alimentação manual.
- Estudar para as variáveis de primeira ordem (granulometria, inclinação e amplitude) diversos níveis para os fatores.
- Estudar as melhores condições para otimização da recuperação metalúrgica na mesa oscilatória.
- Avaliar a influência do fator de forma das partículas sobre a recuperação de liga metálica

REFERÊNCIAS

1. ANDERY, P A. In memorian. **Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia**. Recife: ITEP, 1980
2. ANJOS, A. **Curso planejamento de experimentos I**. Universidade Federal do Paraná. Departamento de estatística (notas de aulas). Curitiba, 2005.
3. ANTONY, J. **Design of experiments for engineers and scientists**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. 152 p.
4. APLAN, F. F. **The Gravity concentration**. In: Fuerstenau, M. C. E Han, K. N. (Ed.). **Principles of Mineral Processing**. SME, 2003, p.185-219.
5. ARAUJO, L. A. **Manual de Siderurgia – Produção**. Editora Arte & Cultura, São Paulo vol.1. 1997
6. BARROS NETO, B. DE et al. **Como fazer experimentos**. Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. Editora da Unicamp, 401 p. Campinas 2001.
7. BATIE, W. Spectrometers for metal analysis. **Advanced Materials & Processes**, n.11, p.25-28, 1997.
8. BORGES, A. C. **Concentração de minério de ferro proveniente do depósito Jambreiro da região de Guanhões – MG via métodos gravíticos e magnéticos**. Trabalho de Conclusão de Curso, CEFET-MG. Araxá, 2015.
9. BORTOLINI, J. **Estudo de experimentos fatoriais 2^k aplicados em um processo industrial**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Lavras (UFLA) Lavras, 2012.
10. BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S., **Statistics for Experiments**, J. Wiley & Sons, 1978.
11. BURT, R.O.; MILLS, C. **Gravity Concentration Technology (Developments in Mineral Processing)**. Elsevier: Volume 5. The Netherlands. Amsterdam 1984.
12. BUSSAB, W. O.; MORETIN, P. A. **Estatística básica**. Ed. Atual. São Paulo, 1985.
13. BUTTON, S.T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultado**. Universidade Estadual de Campinas. Apostila São Paulo, 2001.

14. CALADO, V.; MONTGOMERY, D. C. **Planejamento de Experimentos usando o Statistica**. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais, 2003, p. 9-43.
15. CAVALCANTE, G.F. e SAMPAIO, C.H. **Investigação do comportamento de separação da espiral de Reichert LD-9 utilizando uma alimentação artificial binária**. UFRGS Disponível em: <http://searchentmme.yang.art.br/download/1995/beneficiamento>)
16. CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. 2º edição, Signus Editora. São Paulo, 2002.
17. CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. São Paulo: ABM, 6ª Edição, 1990.
18. DING, W. **Equilibrium Relations in the Production of Manganese Alloys**. 1993. Tese (Doktor Ingenioravhandling) – Metallurgist Institutt. Trondheim, 1993
19. FALCONER, A. **Gravity separation: Old technique/New Technique**. Phys. Sep. Sci. Eng. 2003, 12, 31–48.
20. FALCON, L. M. **The gravity recovery of cassiterite**. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, abril 1982
21. FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE MINAS GERAIS (FEAM). **Levantamento da Situação Ambiental e Energética do Setor de Ferroligas e Silício Metálico no Estado de Minas Gerais, com Prospecção de Ações para o Desenvolvimento Sustentável da Atividade**. Relatório de Requisitos Legais. Belo Horizonte Julho 2010
22. GALDÁMEZ, E. V. C. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002.
23. GÓES, M. A. C.; LUZ, A. B.; POSSA, M. V. **Amostragem**. In: LUZ A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. Tratamento de minérios. 4º ed. CETEM/MCT, 2004, p. 19.
24. KHODOROVSKY, Y. A. R.. **Production of Ferroalloys**, 1972.
25. KUSNO I., BIRAWIDHA, D. C. **Beneficiation of low grade iron ore with manganese content as raw material for ferro mineral**. International Journal of Engineering & Technology-Indonesian Institute of Science (LIPI). Vol: 11 n°: 03. Indonésia, 2011.

26. JMENDO (Consultoria). **Perfil da Mineração de Manganês**. Ministério de Minas e Energia (MME). 2009.
27. LEGORRETA-GARCÍA F., OLVERA-VENEGAS P.N., HERNÁNDEZCRUZ L.E., VERGARA-GÓMEZ E., BOLARÍN-MIRÓ ANA M. e SÁNCHEZ DE JESÚS F. **Caracterización y separación gravimétrica de arenas de caolín procedente de Agua Blanca de Iturbide**, Hidalgo (México), 2010.
28. LINS, F.A.F. **Concentração gravítica**. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2004. Cap. 6. P. 241-268.
29. LÚCIO, A.; MINES, C.R.C.; CASTRO, L.F.A.; FIGUEIRA, R.M.; SAMPAIO, R.S. & SILVEIRA, R.C. **Metalurgia dos Ferro ligas**, vol I e II, Belo Horizonte: editora UFMG, 1980.
30. LÚCIO, A. **Metalurgia dos Ferro-Ligas vol. II**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 1978.
31. **MANUAL TECNICO DA RDM (Rio Doce Mineração)**, 2005.
32. MALAYOGLU U. **Study on the Gravity Processing of Manganese Ores** **Department of Mining Engineering**, Division of Mineral Processing Asian Journal of Chemistry, Vol. 22, No. 4. Turkey, 2010.
33. MENDES, C. M.; OLIVEIRA, L. T. **O Manganês para fins metalúrgicos**. In: Siderurgia Brasileira e Matérias Primas, Associação Brasileira de Metais-ABM, São Paulo, 1982.
34. MICHAEL, S. **Placer gold recovery methods**. Special publication 87. Department of Conservation. Division of Mines and Geology. California, 1986.
35. MITCHELL, C. J., STYLES, M. T. AND EVANS, E. J. **The design, construction and testing of a simple shaking table for gold recovery**: Laboratory testing and field trials. Technical report. Overseas Geology Series, 1997.
36. MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 7. ed. New York: John Wiley & Sons, 2009. 656 p.
37. MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**, 4th edition. New York, Wiley, 1997.
38. MULAR, A. L., DOUG, N. H., e DEREK J. B. **Mineral Processing Plant Design**, Practice, and Control. Proceedings vol 1 - vol 2. 2002.

39. MURPHY, J. N.; MEADOWCROFT, T. R.; BARR, P. V. **Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag.** *Canadian Metallurgical Quarterly*, v.36, n.5, p.315-331, 1997.
40. NOBREGA, M. P., **Estudo Comparativo de Gráficos de Probabilidade Normal para Análise de Experimentos Fatoriais não Replicados.** Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em matemática aplicada e estatística. UFRN. Natal, 2010.
41. OLSEN, S. E; TANGSTAD, M; LINDSTAD, Tor. **Production of Ferromanganese Alloys in the Submerged Arc Furnace.** Trondheim, Norway. 247p. 2007.
42. OLSEN, S. E; DING, W., KOSSYREVA, OLGA A., and TANGSTAD, M. **Equilibrium in Production of High Carbon Ferromanganese.** INFACON7, 591-600, 1995.
43. OLSEN, S.E. e TANGSTAD, M. **Silicomanganese production and process understanding.** Tenth International Ferroalloys Congress. Capetown, África do Sul, 2004.
44. PRYOR, E. J. **Mineral Processing.** American Elsevier Publishing, 3º Edition, 844 p. New York ,1965
45. REIS, E. L. **Caracterização de resíduos provenientes da planta de beneficiamento do minério de manganês sílico carbonatado da RDM-Unidade Morro da Mina.** Dissertação mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.
46. RIZZO, E. M. S. **Introdução ao Processos de Refino Secundário dos aço.** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM). São Paulo - 2006.
47. SUMÁRIO MINERAL 2009. Ministério de Minas e Energia. **Perfil ferro ligas.** Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/P34_RT60_Perfil_de_Ferroligas. Acesso em 08 de janeiro de 2017
48. SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C.; SILVA, A. O. **Em Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais**, eds.; CETEM/MCT: Rio de Janeiro, 2007, cap. 15.
49. SAMPAIO, C.H. & TAVARES, L. M. M. **Beneficiamento Gravimétrico: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade.** Editora da UFRGS. Porto Alegre, 2005.
50. SHAHRAM SHARIATI, A. R. e ARMIN, S. **Beneficiation of Low-Grade Phosphate Deposits by a Combination of Calcination and Shaking Tables.** Southwest Iran Shahram i Academic Editor: Kota Hanumantha. Rao, 2015

51. SILVEIRA, R.C & ALMEIDA, A.M.M. **Projeto e operação dos fornos elétricos de redução**. São Paulo: editora Associação Brasileira de Metais, 1987.
52. SUNIL, K. T.; RAMAMURTHY Y., e VEERENDRA S. **Recovery of Chromite Values from Plant Tailings by Gravity Concentration**. Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, Vol. 10, No.1, pp.13-25. Jamshedpur, 2011
53. TEIXEIRA, A. M. S., SAMPAIO, J. A., BERTOLINO, L. C., CARDOSO, E. F. e BORGES, L. C. P. **Caracterização tecnológica da escória Fe-Cr baixo carbono e recuperação da liga metálica por mesa oscilatória**. Revista Holos, IFRN
54. VON KRUGER, P. **Perfil de ferroligas**. Relatório técnico 60, 2010.
55. WILLS, B. A. Wills. **Mineral Processing Technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery**. 7. ed. Oxford: Elsevier, 2006. 444 p.
56. <https://www.911metallurgist.com/blog/gold-shaking-tables> acessado em 07 de janeiro de 2017.