

# UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



LETÍCIA GARCIA REZENDE GENELHÚ

ANÁLISE DE UMA METODOLOGIA PARA PREVISÃO DE RECUPERAÇÃO MÁSSICA EM UMA PLANTA DE MINÉRIO DE FERRO

**OURO PRETO** 

#### LETÍCIA GARCIA REZENDE GENELHÚ

# ANÁLISE DE UMA METODOLOGIA PARA PREVISÃO DE RECUPERAÇÃO MÁSSICA EM UMA PLANTA DE MINÉRIO DE FERRO

Monografia apresentada ao curso de graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro de Minas.

Orientador: Hernani Mota de Lima

Coorientador: Josué Mesquita de Souza

Júnior

**OURO PRETO** 

# SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G326a Genelhú, Leticia Garcia Rezende .

Análise de uma metodologia para previsão de recuperação mássica em uma planta de minério de ferro. [manuscrito] / Leticia Garcia Rezende Genelhú. - 2019. 65 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima. Coorientador: Prof. Me. Josué Mesquita de Souza Júnior. Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de

1. Beneficiamento de minério. 2. Planejamento de lavra. 3. Caracterização de minério. I. Lima, Hernani Mota de. II. Souza Júnior, Josué Mesquita de. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 622.75





#### MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO Universidade Federal de Ouro Preto Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas



## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 13 dias do mês de dezembro de 2019, às 14h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas DEMIN/EM, no Campus Universitário Morro do Cruzeiro, foi realizada a defesa da Monografia de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 — Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado "ANÁLISE DE METODOLOGIA PARA PREVISÃO DE RECUPERAÇÃO MÁSSICA EM UMA PLANTA DE MINÉRIO DE FERRO", pela aluna Letícia García Rezende Genelhu, sendo a comissão avaliadora formada por Prof. Dr. Hernani Mota de Lima (orientador), Eng." de Minas Geriane Macedo Rocha e Eng." de Minas Rodrigo de Oliveira Severino.

A aluna fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 — Trabalho de Conclusão de Curso II após o depósito, no site do Repositório UFOP, da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas — CEMIN.

Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pela discente.

Ouro Preto, 13 de dezembro de 2019.

Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

Presidente da Comissão Avaliadora e Orientador

Curiame Hacido Rocha Eng.<sup>a</sup> de Minas Geriane Macedo Rocha Membro da Comissão Avaliadora

Eng.º de Minas Rodrigo de Oliveira Severino

Membro da Comitsão Avaliadora

Leticia Garcia Recende Genelhu

Prof. M.Sc. José Fernando Miranda

Professor responsável pela Disciplina Min 492 – Trabalho de Conclusão de Curso

#### **AGRADECIMENTOS**

À minha família, em especial meus pais e meus avós, por todo apoio e incentivo ao longo da minha vida.

Aos professores do DEMIN, pelo conhecimento repassado.

Aos meus amigos que fizeram dos meus dias de graduação dias mais leves.

Ao Josué Mesquita, por toda ajuda e orientação.

Ao time da ArcelorMittal, por toda contribuição ao meu crescimento profissional e pessoal, e por terem me permitido desenvolver e apresentar este projeto.

#### **RESUMO**

O presente trabalho apresenta a análise de uma metodologia de predição de recuperação mássica baseada em testes de líquido denso com o objetivo de caracterizar as amostras, calcular a recuperação mássica prevista e verificar possíveis melhorias na metodologia. Foram estudadas 18 amostras de testemunho de sondagem do planejamento a longo prazo das minas de Mont Wright e Fire Lake, no Canadá. A relevância do estudo está em obter um bom planejamento de lavra para garantir a extração ordenada de minério durante a vida útil da mina e com isso homogeneizar a alimentação da planta. O estudo foi conduzido no Departamento de Processamento Mineral Maizières. Os testes de líquido denso levaram a bons resultados. Todas as amostras foram caracterizadas e tiveram seu Wrec calculado. Foi observado que a liberação é um fator-chave na análise da eficiência do processo, explicando praticamente todos os resultados de recuperação e qualidade. Também foi observada uma boa correlação entre a razão de concentração e o grau de liberação da ganga. Além disso, a distribuição de %Fe está direta e positivamente correlacionada com a distribuição granulométrica, aumentando junto com ela. Visto isso, o cenário de melhor qualidade para espirais é esperado ao alimentar o processo com amostras mais grossas. Esse tipo de material também apresenta menor perda em frações mais finas.

Palavras-chave: Testes de Líquido Denso, Recuperação Mássica, Caracterização.

#### **ABSTRACT**

This work presents an analysis of a weight recovery prediction methodology based on heavy liquid tests aiming to characterize the samples, calculate the predicted weight recovery and asses viable methodology improvement. Eighteen drill core samples of the long-term planning from Mont Wright and Fire Lake mines were analysed. This study is relevant to obtain a good extraction planning to assure the ordained iron ore extraction during the mine's life, and thereby homogenize the plant feed. This study was conducted in the Maizières Mining and Mineral Processing Department. The heavy liquid tests lead to good results. All samples were characterized and had their Wrec calculated. It was observed that liberation plays a key part in the process efficiency, explaining nearly all results of recovery and quality. It was observed a good correlation between the concentration ratio and the gangue liberation degree. In addition, the %Fe distribution is directly and positively correlated, increasing alongside with it. Therefore, the best quality scenario is expected when coarse samples are fed. This material also presents less loss in finer fractions.

Keywords: Heavy Liquid Tests, Weight Recovery, Characterization.

# SUMÁRIO

1.	INTF	RODUÇÃO	14
2.	OBJ	ETIVOS	16
3.	REV	ISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3	3.1. <i>A</i>	as Minas	17
3	5.2. <i>P</i>	amostras	18
3	.3. C	Geologia	22
3	s.4. C	Cálculo do Wrec	23
3	5.5. T	estes de Líquido Denso	27
4.	MET	ODOLOGIA	29
4	·.1. C	Caracterização	30
	4.1.1	. Amostragem	30
	4.1.2	. Desmagnetização	30
	4.1.3	s. Granuloquímica	31
	4.1.4	. Liberação	32
	4.1.5	5. Densidade	32
	4.1.6	s. Satmagan	33
	4.1.7	7. Análise Química	35
	4.1.8	s. Análise Modal	35
4	.2. (	Cominuição	36
	4.2.1	. Cominuição Primária	36
	4.2.2	. Cominuição Secundária	37
	4.2.3	. Cominuição Terciária	37
4	.3. (	Concentração	38
	4.3.1	. Líquido Denso	39
5.	RES	ULTADOS	41
5	5.1. C	Caracterização	41

	5.1.1.	Análise Química	41
	5.1.2.	Análise Modal	43
	5.1.3.	Densidade	45
	5.1.4.	Size by Size	46
	5.1.5.	Liberação	48
5	.2. Co	ncentração	52
	5.2.1.	Líquido Denso	52
	5.2.2.	Wrec	56
6.	CONC	LUSÃO	63
7.	BIBLIC	OGRAFIA	65

# **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1. Localização das minas de Mont Wright e Fire Lake	17
Figura 2.Port Cartier	18
Figura 3. Amostras dos furos de sondagem originais	19
Figura 4. Localização dos furos de Mont Wright	21
Figura 5. Localização dos furos de Fire Lake	21
Figura 6. Seção do furo 2018_83	22
Figura 7. Seção do furo 2018_82	22
Figura 8. Mapa geológico da mina de Mont Wright	23
Figura 9. Gráfico da correlação entre as recuperações de ferro realizadas em t	estes
de planta piloto e as realizadas em testes de planta piloto	25
Figura 10. Recuperação mássica predita a partir de testes com os furos vs $\%$	Fe na
alimentação do concentrador	26
Figura 11. Procedimento dos testes	29
Figura 12. Quarteadores Standalone e de bancada	30
Figura 13. Desmagnetizador de mesa Selter	
Figura 14. Sinex e peneira de 30 cm	31
Figura 15. Peneirador de bancada Haver EML Digital Plus	31
Figura 16. Microscópio Leica DM 4500 P	32
Figura 17. Picnômetro a gas AccuPyc II 1340	33
Figura 18. Satmagan 135	33
Figura 19. Calibração do Satmagan	34
Figura 20. Quantidade de FeO e Magnetita	34
Figura 21. Britador de mandíbula Retsch	36
Figura 22. Britador de rolos	37
Figura 23. Ciclo de britagem e peneiramento	38
Figura 24. Fluxograma dos testes de líquido denso	39
Figura 25 Líquido denso (LST) e densímetro	40
Figura 26. Funil separador e filtro	40
Figura 27. Evaporador rotatório e agitador magnético com aquecedor	40
Figura 28. Teores de SiO2 e Ferro por amostra	42
Figura 29. Correlação entre os principais elementos das amostras	43
Figura 30. Distribuição de minerais por amostra	44

Figura 31. Correlação entre os principais minerais das amostras	45
Figura 32. Correlação entre densidade e teor de ferro por amostra	46
Figura 33. Distribuição granulométrica das amostras cabeça	47
Figura 34. Distribuição Granulométrica por amostra	47
Figura 35. Distribuição de ferro por fração granulométrica	48
Figura 36. Liberação dos óxidos de ferro	49
Figura 37. Liberação da ganga	49
Figura 38. Tipo de partículas na fração >425µm <850µm	50
Figura 39. Tipo de partículas na fração >212µm <425µm	51
Figura 40. Tipo de partículas na fração >106µm <212µm	51
Figura 41. SiO2 vs Fe vs Recuperação mássica	54
Figura 42. Recuperação mássica geral das amostras	55
Figura 43. Distribuição global de Ferro	56
Figura 44. Parâmetros do Wrec representados em um bubble plot de recu	peração
de ferro	57
Figura 45. Valores de Wrec por amostra	59
Figura 46. Teor de %Fe alimentado nos testes de líquido denso vs Wrec ca	alculado
	60
Figura 47. Recuperação mássica vs grau de liberação dos óxidos de ferro	61
Figura 48. Razão de concentração vs grau de liberação	62

# **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Descrição das amostras	20
Tabela 2. Legenda de textura e litologia	20
Tabela 3. Número de partículas analisadas por fração	32
Tabela 4. Metodologias das análises químicas	35
Tabela 5. Parâmetros dos ciclos de cominuição e peneiramentos	38
Tabela 6. Parâmetros do teste de líquido denso	39
Tabela 7. Análise quimica das amostras cabeça	41
Tabela 8. Análise modal das amostras cabeça	43
Tabela 9. Densidade das amostras cabeça	45
Tabela 10. Acrônimos da liberação	50
Tabela 11. Resultados dos testes de líquido denso	52
Tabela 12. Valores do Wrec e seus parâmetros	57
Tabela 13. Comparação com o balanço do BILCO	58
Tabela 14. Razão de concentração e liberação da ganga	61

### 1. INTRODUÇÃO

Mont Wright e Fire Lake são duas minas de minério de ferro localizadas em Quebec, no Canadá. Mont Wright é um ativo muito importante da ArcelorMittal e opera 365 dias por ano para produzir mais de 26 milhões de toneladas de concentrado de minério de ferro, via um processo composto de um estágio de moagem, seguido por um circuito de espirais. Existem aproximadamente 8.500 espirais na usina de Mont Wright, o que permite que o teor de ferro do minério aumente de 30% no ROM (*run of mine*) para 66% no concentrado final (ARCELORMITTAL, 2012).

Durante o processo de concentração é muito importante avaliar a performance do concentrador para diferentes teores de entrada. Saber o comportamento da alimentação futura permite que o planejamento desenvolvido seja mais preciso e, consequentemente, garanta uma alimentação mais homogênea. Isso pode minimizar perdas de performance resultantes das variações de alimentação/processo, garantindo maximização dos ganhos econômicos.

Para obter uma alimentação homogênea, é essencial ter um bom planejamento de lavra para garantir a extração ordenada de minério durante a vida útil da mina. Para alcançar esse objetivo, um estudo geometalúrgico foi realizado no Canadá, em 1971, pelo Laboratório de Pesquisa Aplicada (ARL) e pela Quebec Cartier Mining Company (QCM) com amostras de sondagem. Foi desenvolvida então uma equação para prever a recuperação mássica da planta com base em testes de líquido denso (Bennett, 1971). O parâmetro encontrado pela equação foi nomeado Wrec (abreviação para recuperação mássica em inglês).

O COREM (laboratório que realiza tais testes) recebe aproximadamente 1000 amostras por ano, que passam pelo procedimento de determinação do Wrec. Os resultados são alimentados no modelo de blocos de longo prazo de Mont Wright.

Em 2018, a ArcelorMittal Canadá solicitou ao Departamento de Mineração e Processamento Mineral de Maizières que compartilhasse com o COREM a carga de trabalho relacionada ao cálculo de Wrec.

Este trabalho de conclusão de curso, apresenta os ensaios com líquido denso realizados com as 18 amostras estudadas, a metodologia seguida, e discute os resultados encontrados.

#### 2. OBJETIVOS

Os objetivos principais deste trabalho foram:

- 1) Caracterizar as amostras dos furos de sondagem de Mont Wright;
- 2) Determinar os valores de Wrec para estas amostras;
- 3) Sugerir melhorias na metodologia proposta e no uso da informação dos cálculos de Wrec.

#### 3.1. As Minas

As minas de Mont Wright e Fire Lake são dois importantes ativos da ArcelorMittal, localizados na região do Québec, no Canadá (Figura 1). De acordo com dados da ArcelorMittal elas operam 24 horas por dia, 365 dias por ano e produzem anualmente mais de 26 milhões de toneladas métricas de concentrado de minério de ferro (ARCELORMITTAL, 2012). O recurso mineral restante do complexo de Mont Wright é de aproximadamente 5,6 bilhões de toneladas de minério de ferro, sendo que, planeja-se operar a mina até o ano de 2045.

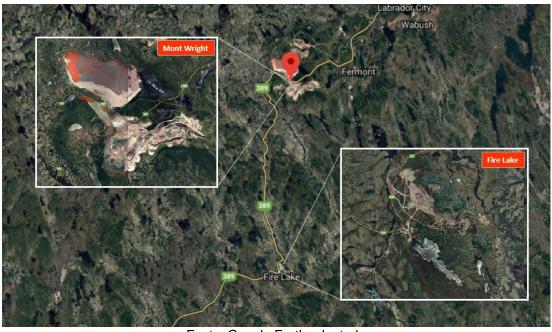


Figura 1. Localização das minas de Mont Wright e Fire Lake

Fonte: Google Earth adaptado

A mina de Fire Lake é uma mina a céu aberto em operação desde 2006, que está localizada a 55 quilômetros ao sul do complexo de Mont Wright. Segundo dados referentes à mina, o teor de ferro mais alto que o de Mont Wright faz com que a contribuição desta mina tenha um papel importante no aumento da produção da ArcelorMittal Canadá. Sem britador ou atividades de concentração no sítio, os processos são similares às de Mont Wright, mas com equipamentos de menor porte. Após a lavra, todo o minério bruto extraído de Fire Lake é transportado para Mont Wright por trem para ser concentrado.

Para concentrar o minério de ferro das minas de Mont Wright e Fire Like na usina de Mont Wright, o material passa por uma rota de processo composta por britagem e moagem, seguida pela concentração em espirais.

De acordo com registros internos o estágio de concentração corresponde a um circuito de espirais composto por um estágio *rougher, cleaner e recleaner*. Esses somam aproximadamente 8.500 espirais, para concentração do minério de ferro (ARCELORMITTAL, 2012).

Uma vez processado na usina de Mont Wright, um terço do concentrado é transportado por trem para a planta de pelotização de Port Cartier (Figura 3), onde o concentrado de minério de ferro é transformado em pelotas. O restante da produção é vendido no mercado externo.



Figura 2.Port Cartier



Fonte: Google Imagens

#### 3.2. Amostras

As amostras utilizadas nesse trabalho correspondem a ¼ de 18 testemunhos de sondagem diamantada de longo prazo coletados nas minas de Fire Lake e Mont Wright. Um exemplo das amostras originais é apresentado na Figura 4.

MA-4392

MA-5251

Figura 3. Amostras dos furos de sondagem originais

Fonte: Compilação do autor

As amostras e suas informações principais são apresentadas na Tabela 1. A Tabela 2 apresenta a legenda para as litologias que foram identificadas no material.

Tabela 1. Descrição das amostras

Amostra	Cava	Furo	Profun	didade	Litologia Principal	Litologia Secundária	Textura (Fe)				Teor (%)			
			De	Até				Fet	FeO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Р	S	PPC
MA-4388	E	2018_82	27.0	33.0	IF		LMP	26,51	3,05	62	0,23	0,012	<0,001	-0,04
MA-4389	Е	2018_82	33.0	39.0	IF	CNR	LMP	19,2	2,04	70,4	0,93	0,034	<0,001	0,63
MA-4390	Е	2018_82	39.0	44.9	IF		LMF	12,58	1,74	82,1	0,17	0,012	<0,001	0,17
MA-4391	Е	2018_82	44.9	48.4	AMP	IF	LMP	15,98	0,26	58,9	6,95	0,218	0,069	0,58
MA-4392	E	2018_82	48.4	54.0	IF		LMP	18,54	5,66	73,5	0,07	0,010	0,004	-0,34
MA-4394	Е	2018_82	60.0	67.0	IF		LMP	19,10	1,33	72,7	0,10	0,009	0,004	-0,37
MA-4395	E	2018_82	67.0	73.4	IF	QR	LMF	13,14	1,26	80,9	0,03	0,007	<0,001	-0,05
MA-4396	E	2018_82	73.4	80.2	IF	QR	LMF	25,70	1,28	62,50	0,26	0,020	<0,001	0,10
MA-4552	E	2018_83	42.0	48.0	IF		LMF	38,11	2,64	44,70	0,19	0,021	<0,001	-0,26
MA-4553	E	2018_83	48.0	54.0	IF		LMF	40,96	3,74	40,90	0,15	0,025	0,001	-0,27
MA-4554	E	2018_83	54.0	60.0	IF		LMF	38,57	2,25	43,60	0,13	0,019	<0,001	-0,16
MA-4555	E	2018_83	60.0	66.0	IF		LMF	40,99	3,99	41,80	0,12	0,013	<0,001	-0,21
MA-4556	Е	2018_83	66.0	72.0	IF		LMF	31,86	11,55	54,30	0,05	0,014	<0,001	-0,96
MA-5137	Main Pit	2018_08F	28.7	33.6	IF		TAC	36,88	13,90	46,00	0,88	0,038	<0,001	-1,17
MA-5247	Main Pit	2018_07F	19.6	25.3	IF		LMP	33,42	1,23	50,40	0,65	0,023	<0,001	0,10
MA-5251	Main Pit	2018_07F	36.4	42.0	IF		LMP	37,38	3,57	46,00	0,24	0,045	0,002	-0,19
MA-5252	Main Pit	2018_07F	42.0	47.7	IF		LMP	36,16	8,59	46,10	0,82	0,046	<0,001	-0,61
MA-5284	Heritage Pit	2018_19F	2.6	8.2	IF	AMPIF	TAC	38,89	1,42	41,40	1,04	0,044	<0,001	0,30

Tabela 2. Legenda de textura e litologia

LITOLOGIA	TEXTURA
IF = Formação Ferrífera	LMP = Bandado com matriz clara (feldspato)
AMP = Anfibolito	LMF = Bandado com matriz escura (quartzo)
<b>GN</b> = Gnaisse	TAC = Spotted
<b>QR</b> = Rocha de quartzo	
<b>QRMS</b> = Rocha de quartzo com xisto de mica	
MA = Calcário	
CNR = Parte não recuperada	

Abaixo na Figura 5 e Figura 6 estão apresentadas as localizações dos furos de sondagem.

Figura 4. Localização dos furos de Mont Wright

Mont Wright

2018 82 / 2018 83

Fonte: Google Earth adaptado



Fonte: Google Earth adaptado

As seções dos furos 2018\_83 e 2018\_82 são apresentadas na Figura 7 e Figura 8.

DDH\_2018\_83
Section - 5975

Mineur de quartzite

Fonte: Relatório Interno

DDH\_2018\_82 Section - 5675

DDH\_2018\_82
AMP

AMP

AMP

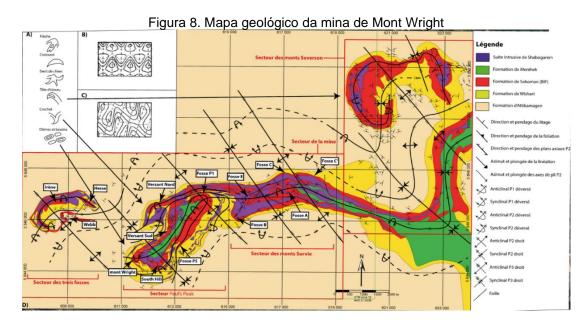
Fonte: Relatório Interno

#### 3.3. Geologia

As amostras de furo de sonda foram coletadas nas minas de Mont Wright e Fire Lake. Elas estão localizadas em um depósito de ferro altamente dobrado e metamorfizado. Este depósito maciço é frequentemente observado na crista dos altos cumes na área de Quebec-Labrador.

A formação tem uma textura granulada com granulometria de média a grossa. É composta de hematita e magnetita numa matriz granular de quartzo, que é o principal mineral de ganga, compreendendo aproximadamente 50% da formação

ferrífera. A textura mais importante é a hematita especular (Brodeur-Grenier, 2018). O mapa geológico de Mont Wright é representado na Figura 9:



Fonte: (Brodeur-Grenier, 2018)

#### 3.4. Cálculo do Wrec

O laboratório ARL auxiliou o QCM (antigo proprietário da mina de Mont Wright) no planejamento das operações de mineração e concentração do depósito de Mont Wright. Eles idealizaram o uso de métodos para os testes com os furos de sondagem, realizando testes de planta piloto em amostras de grande escala (bulk samples) e especificando a rota de processo para concentração do minério. Baseado nesse trabalho, a ARL recomendou uma técnica para predição da performance da planta em 1971, a partir dos resultados de testes em escala laboratorial nos furos de sondagem (Bennett, 1971).

Para relacionar os resultados dos testes de líquido denso com a performance da planta em Mont Wright, oito "bulk samples" que representavam vários tipos de minérios foram obtidas e processadas em uma usina piloto. Os testes laboratoriais de líquido denso foram realizados em amostras da alimentação da usina piloto, e os resultados do laboratório correlacionados com os da planta piloto.

Esta técnica de predição é essencial para realizar um planejamento que garanta a extração ordenada do minério, e ao mesmo tempo mantenha uma qualidade uniforme da alimentação da planta. O método de predição sugerido pela ARL envolve tratamento dos resultados dos testes de líquido denso em computador,

realizados com as amostras de testemunhos de sondagem para predizer a recuperação mássica que provavelmente será obtida na planta para cada bloco da mina.

O método estabelece dois fatores como premissas:

- Os 3 estágios de espirais produzem um concentrado com 66.3% de Fe e 5% de SiO<sub>2</sub> (majoritariamente devido a compromissos de mercado); e
- Variações na alimentação da planta iriam refletir na recuperação mássica e metalúrgica de Fe.

Como o teor final de ferro precisa ser mantido constante (66.3%), uma relação simples entre alimentação e recuperação mássica pode ser traçada:

$$R_w = h \times R_{Fe} / 66,3...$$
 [1]

Rw – Recuperação mássica prevista%

R<sub>Fe</sub>- Recuperação de Ferro %

h - %Fe na alimentação da planta

Considerando a equação 1, além do teor de Fe na alimentação, é necessário determinar a recuperação de Fe no concentrado final para determinar a recuperação mássica do processo. Para fazer isso, foi adotada uma correlação entre as recuperações de ferro dos testes de líquido denso e dos testes piloto para auxiliar na obtenção da informação requerida. Devido às características inerentes ao processo, as recuperações de Fe para duas frações granulométricas diferentes foram consideradas separadamente como explicado abaixo.

Nos testes laboratoriais foi observado a existência de uma boa correlação entre a recuperação de ferro do concentrado, com a da planta piloto e com a do líquido denso nas frações acima de 106 µm. A equação correlacional e o gráfico são apresentados na Figura 10.

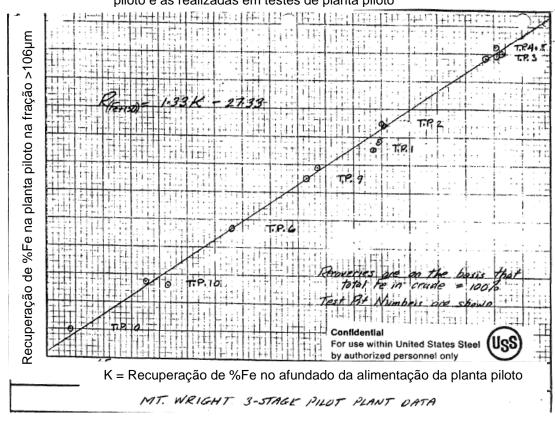


Figura 9. Gráfico da correlação entre as recuperações de ferro realizadas em testes de planta piloto e as realizadas em testes de planta piloto

Fonte: (Bennett, 1971)

Usando a fórmula acima ( $R_{Fe} = 1,33 \text{ K} - 27,33$ ) é possível determinar a parte da recuperação de Fe no processo relativa à fração >106  $\mu$ m.

Com relação à fração <106 µm, nenhuma correlação foi observada entre os testes de escala piloto e os testes de líquido denso. Foi assumido então, baseado no histórico de dados e na experiência dos engenheiros, que 40% do ferro contido nessa fração seria recuperado no concentrado (essa recuperação provavelmente depende mais de parâmetros operacionais do que das características do minério). Combinando as últimas duas equações a fórmula abaixo é obtida:

$$R_{Fe} = 1,33 \text{ K} + 0,4 \text{ P} - 27,33...$$

K – Recuperação de ferro na porção >106 μm.

P – Porcentagem de distribuição de ferro no minério bruto na fração <106 µm.

Usando as equações 1 e 2 juntas é possível estimar a recuperação mássica de uma amostra a partir da equação 3. A equação final é apresentada abaixo.

h – Porcentagem de ferro no minério bruto.

A Figura 11 abaixo mostra a correlação entre recuperação mássica predita a partir dos testes nos testemunhos de sondagem e o teor de Fe na alimentação do concentrado.

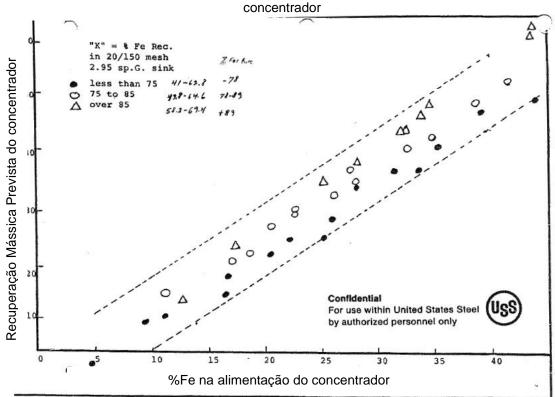


Figura 10. Recuperação mássica predita a partir de testes com os furos vs %Fe na alimentação do

Fonte: (Bennett, 1971)

Seguindo este procedimento, as recuperações mássica e metalúrgica da usina podem ser calculadas usando os parâmetros estabelecidos acima.

Testes mostram que mesmo que a liberação dos óxidos de ferro apresentasse uma alta variação, o teor do concentrado seria mantido. Entretanto, a recuperação de

ferro diminuía com o aumento da proporção de minerais disseminados na alimentação.

Esperava-se que nenhuma predição fosse necessária para os minérios com teor de Fe menor que 15%, visto que esse tipo de material deveria ser classificado como estéril na mina. Em casos raros, quando são observados testemunhos com 65% de Fe e a recuperação de ferro prevista encontra-se acima de 95%, as recuperações mássicas calculadas apresentam resultados acima de 100%. Estes são valores irreais e devem ser reduzidos no modelo de blocos. Outra observação é que há indícios que a recuperação mássica é aditiva. Quando blendadas massas iguais de duas amostras com recuperações mássicas diferentes, a recuperação mássica resultante será a média entre elas.

#### 3.5. Testes de Líquido Denso

Testes de liquido denso consistem na separação de grãos com densidades médias diferentes por um meio de densidade intermediaria aos minerais ali presentes. Esse meio pode ter origens distintas, como: líquidos orgânicos, soluções de sais e suspensões de sólidos em líquidos. Cada um desses meios apresenta densidades e temperaturas diferentes, nas quais são viáveis para o uso laboratorial. Normalmente as densidades variam entre 1,25 e 3,40 g/cm³ (SAMPAIO, FRANÇA, & BRAGA, 2007)

A viabilidade da aplicação dos líquidos em escala industrial depende de alguns fatores técnicos e econômicos, como: diferença de densidade entre o mineral útil e a ganga, granulometria da amostra, e da densidade do meio (SAMPAIO, FRANÇA, & BRAGA, 2007).

A diferença de densidade é essencial para que o meio denso seja efetivo na separação. Quando a densidade dos minerais uteis e de ganga são muito próximas, as fases normalmente não podem ser separadas.

A granulometria é outro fator importante para a eficiência do teste, pois esta depende diretamente da disseminação dos minerais na rocha. Minerais muito disseminados requerem uma granulometria de liberação muito fina, o que impacta diretamente na recuperabilidade das fases no teste, visto que partículas muito finas

tendem a ficar em suspensão por mais tempo, afetando a visibilidade da linha de separação das fases.

A densidade do meio deve necessariamente ser intermediaria a densidade dos minerais ali presentes (SAMPAIO, FRANÇA, & BRAGA, 2007). Muitas vezes o alto custo destes líquidos é um fator limitante para a viabilidade do teste.

Os testes de líquido denso para Mont Wright são realizados com testemunhos de sondagem do planejamento a longo prazo para determinar valores de Wrec. Esses testes são normalmente feitos pelo laboratório COREM (COREM, 2016), localizado em Quebec City (Canadá). O COREM recebe aproximadamente 1000 amostras por ano, que são testadas de acordo com o procedimento do Wrec definido pela ARL. Os resultados encontrados alimentam o modelo de blocos de longo prazo de Mont Wright.

A Figura 12 apresenta a metodologia seguida.

**TESTEMUNHO** 10 kg COMINUIÇÃO DIVISÃO RESERVA , 2 kg COMINUIÇÃO COMINUIÇÃO PENEIRAMENTO DIVISÃO CARACTERIZAÇÃO RESERVA 435 g DEMAGNETIZAÇÃO DENSIDADE **PENEIRAMENTO** SATMAGAN **↓100** g ANÁLISE QUÍMICA LÍQUIDO DENSO SATMAGAN ANÁLISE QUÍMICA

Figura 11. Procedimento dos testes

Fonte: Compilação do autor

É importante notar que os procedimentos apresentados acima foram baseados na metodologia adotada pelo COREM para a determinação do Wrec (COREM, 2016).

#### 4.1. Caracterização

Para preparar as amostras recebidas para os testes de liquido denso, os testemunhos foram tratados em vários equipamentos. Abaixo estão listados todos os equipamentos utilizados, de controle de granulometria a amostragens e quarteamentos.

#### 4.1.1. Amostragem

Todos os quarteamentos e amostragens foram realizados com os amostradores Standalone Rotating Sample Divider (Model IA-FS) e Benchtop Rotating Sample Divider representados na Figura 13, ambos produzidos pela Rocklabs.



Figura 12. Quarteadores Standalone e de bancada

Fonte: Compilação do autor

#### 4.1.2. Desmagnetização

De acordo com o procedimento do COREM, antes do peneiramento é necessário desmagnetizar as amostras para evitar o aglomeramento de partículas, o que poderia interferir na eficiência desta etapa. Todo trabalho de desmagnetização foi realizado no desmagnetizador de mesa Selter apresentado na Figura 14.



Figura 13. Desmagnetizador de mesa Selter

Fonte: Google Imagens

#### 4.1.3. Granuloquímica

Para preparar as amostras britadas para os testes de líquido denso é necessário realizar um peneiramento a úmido em 106 µm, descartando assim a fração mais fina. Isso foi feito utilizando o vibrador SINEX equipado com peneiras de 45 cm (Figura 15).

Figura 14. Sinex e peneira de 30 cm

Fonte: Compilação do autor

Foi realizada uma análise granulométrica com o oversize do peneiramento a úmido em 106 µm para avaliar a distribuição dos elementos químicos por fração granulométrica nas amostras britadas. O separação por fração foi realizada à seco utilizando peneiras de 30 cm com aberturas de 425 µm, 212 µm, 106 µm, montadas em um peneirador Haver EML Digital Plus (Figura 16). O material foi peneirado durante 20 minutos com uma amplitude de 1 mm.



Figura 15. Peneirador de bancada Haver EML Digital Plus

Fonte: Google Imagens

#### 4.1.4. Liberação

O estudo de liberação foi realizado utilizando a metodologia de Gaudin com um microscópio Leica DM 4500 P, distribuído pela Lordil (Figura 17).



Figura 16. Microscópio Leica DM 4500 P

Fonte: Google Imagens

O parâmetro utilizado para definir o número de partículas a serem contadas por fração foi a diferença entre o desvio padrão das últimas três medidas. Se o valor estivesse abaixo de 1.0% a contagem era encerrada. As frações granulométricas estudadas e o número de partículas analisadas são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Número de partículas analisadas por fração

Amostras	Contagem						
Alliostias	>425µm	>106µm					
MA-4388	328	321	217				
MA-4390	359	268	422				
MA-4391	326	319	215				
MA-4555	292	314	213				
MA-4556	323	323	227				
MA-5247	295	347	225				

#### 4.1.5. Densidade

Um picnômetro modelo AccuPyc II 1340 (Figura 18), distribuído pela Micromeritics foi utilizado para realizar as medidas de densidade.

Figura 17. Picnômetro a gas AccuPyc II 1340



Fonte: Google Imagens

#### 4.1.6. Satmagan

Os testes de Satmagan foram realizados para determinar a quantidade de magnetita presente nas amostras, tanto nos produtos da classificação granulométrica, quanto nos produtos dos testes de líquido denso. Para cada amostra analisada, o resultado foi uma média de três medidas (realizadas com um fator 10x). O equipamento utilizado foi um Satmagan 135 (Figura 19), distribuído pela *Rapiscan Systems*.

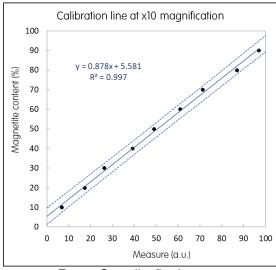
Figura 18. Satmagan 135



Fonte: Compilação do autor

Na Figura 20 é mostrada a curva de calibração usada para converter as medidas do Satmagan em quantidade de magnetita.

Figura 19. Calibração do Satmagan



Fonte: Compilação do autor

Devido a imprecisão do Satmagan, para amostras com quantidades de magnetita menores do que 5%, uma equação de regressão entre FeO e magnetita foi usada. A curva foi construída a partir de amostras com maior quantidade de magnetita e está apresentada na Figura 21.

Figura 20. Quantidade de FeO e Magnetita

Magnetite Satmagan (%) [A] vs. FeO (%)

MA 4388

MA 4388

MA 4388

MA 4388

MA 4392

MA 4392

MA 4393

MA

Fonte: Compilação do autor

### 4.1.7. Análise Química

Todas as análises químicas realizadas neste projeto foram executadas pelo laboratório da ALS na Irlanda. As metodologias utilizadas para analisar as amostras estão contidas na Tabela 4.

Tabela 4. Metodologias das análises químicas

Análise	Código	Elementos
Fluorescência de Raio X - XRF	ME- XRF21U	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , As, Ba, CaO, Cl, Co, Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Cu, Fe, K <sub>2</sub> O, MgO, Mn, Na <sub>2</sub> O, Ni, P, Pb, S, SiO <sub>2</sub> , Sn, Sr, TiO <sub>2</sub> , V, Zn and Zr
Fe++	FE-VOL05	FeO
PPC	OA- GRA05x	LOI
XRF na amostra do líquido denso	ME- XRF12K	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , As, Ba, CaO, Cl, Co, Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Cu, Fe, K <sub>2</sub> O, MgO, Mn, Na <sub>2</sub> O, Ni, P, Pb, S, SiO <sub>2</sub> , Sn, Sr, TiO <sub>2</sub> , V, Zn and Zr

### 4.1.8. Análise Modal

A análise modal foi realizada para determinar a composição mineralógica das amostras. Para isso foram usados os resultados do DRX (Difração de Raios X) e também as análises químicas, que foram imputadas em uma sub-rotina no Excel, desenvolvida pela equipe de caracterização. Essa sub-rotina foi calculada especialmente para Mont Wright baseada nos minerais que poderiam ser encontrados na região.

A sub-rotina calcula primeiro a massa molecular dos minerais identificados, baseado em formulas empíricas, e os números de mols de cada composto químico. Para estimar a fração por massa de cada mineral, alguns tem preferência na ordem de cálculo, como a magnetita, que usou as medidas do Satmagan.

Em sequência, os resíduos dos compostos químicos, em mols, são minimizados (usando uma extensão do solver) para calcular a quantidade de minerais silicáticos, com múltiplos compostos químicos. Por fim, a quantidade dos minerais principais

(como hematita e quartzo) foram estimadas para somar aproximadamente 100% (Bottoso, 2019).

### 4.2. Cominuição

A cominuição foi feita de maneira a gerar o mínimo possível de finos, evitando que o material fosse cominuido em excesso no processo, pois a fração <106 μm é excluída do teste de líquido denso. Isso acontece pois, devido a granulometria pequena, essas partículas quando nas espirais, podem sofrer arraste e não serem tão bem classificadas. Também no teste, o comportamento dessas partículas não reflete no geral o que acontece na usina, e dificulta na visualização das fases flutuado e afundado, devido a quantidade de partículas suspensas. Dessa maneira, os testes de líquido denso foram realizados excluindo à fração <106 μm, para que esta não comprometesse o processo.

### 4.2.1. Cominuição Primária

Para adequar as amostras dos furos para britagem secundária, as amostras foram alimentadas no britador de mandíbulas *Retsch BB250XL Mangan/gehärtet* (Figura 22), ajustado com uma abertura de saída na posição fechada de 10mm.



Figura 21. Britador de mandíbula Retsch

Fonte: Google Imagens

## 4.2.2. Cominuição Secundária

Depois da britagem primária, um britador de rolos MBE MN934/2 (Figura 23) com uma abertura de saída na posição fechada de 2,8 mm, foi utilizado para diminuir a granulometria.

Figura 22. Britador de rolos

Fonte: Compilação do autor

## 4.2.3. Cominuição Terciária

A britagem terciária foi realizada utilizando um circuito fechado, com o mesmo equipamento da britagem secundária. Este circuito era um ciclo de estágios de britagem e peneiramento, como apresentado na Figura 24. Isto foi feito para prevenir a britagem excessiva do material.

COMINUIÇÃO os PENEIRAMENTO COMINUIÇÃO (850 µm) (3.3 mm) PENEIRAMENTO COMINUIÇÃO (850 µm) (2.0 mm) os COMINUIÇÃO PENEIRAMENTO (850 µm) (1.0 mm) PENEIRAMENTO COMINUIÇÃO (850 µm) (850 µm) PENEIRAMENTO US **PRODUTO** 

Figura 23. Ciclo de britagem e peneiramento

O último estágio (britagem até  $850 \, \mu m$ ) foi repetido até que 97% da massa estivesse abaixo de  $850 \, \mu m$ . Os parâmetros do peneiramento e da britagem são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros dos ciclos de cominuição e peneiramentos

Parâmetros							
Tempo de peneiramento	3 min						
Amplitude (mm)	1						
	1 <sup>st</sup>	3,30					
Abertura do estágio	2 <sup>nd</sup>	2,00					
de cominuição (mm)	3 <sup>rd</sup>	1,00					
	4 <sup>th</sup>	0,85					

### 4.3. Concentração

Os testes de líquido denso foram feitos seguindo o procedimento original da ARL . O teste consistia em misturar a amostra da alimentação com o líquido denso LST no funil separador e esperar que as fases se separassem para que elas pudessem ser coletadas. O procedimento do teste é descrito no fluxograma da Figura 25.

LÍQUIDO DENSO EVAPORADOR ÁGUA DESTILADA (2.95g/ml) ROTATÓRIO LÍQUIDO DENSO DILUÍDO CONCENTRADO AFUNDADO **FILTRADO** TESTE DE LÍQUIDO FILTRO FORNO DENSO FLUTUADO REJEITO FILTRADO ÁGUA DESTILADA PRODUTOS SECOS (50g)

Figura 24. Fluxograma dos testes de líquido denso

## 4.3.1. Líquido Denso

Para os testes de líquido denso foi utilizado o produto denominado LST. Este líquido corresponde a uma solução de heteropolitungstatos de lítio diluídos em água. O líquido foi evaporado para atingir uma densidade de aproximadamente 2.96g/ml, a densidade escolhida para os testes. Os parâmetros do teste são mostrados na Tabela 6:

Tabela 6. Parâmetros do teste de líquido denso

Parâmetros do teste de Líquido Denso							
Densidade do LST	2,96 g/ml						
Tempo de Subsidência	1 hora						
Massa das amostras	≈ 50 g						

Um densímetro foi usado para medir a densidade. O líquido LST e densímetro são representados na Figura 26.

Figura 25. . Líquido denso (LST) e densímetro



Um funil separador de 250ml foi utilizado nos testes. Depois, um filtro a vácuo foi utilizado para recuperar os produtos afundados e flutuados (Figura 27).

Figura 26. Funil separador e filtro



Fonte: Compilação do autor

Um evaporador rotatório Heidolph foi utilizado junto de um bequer e um agitador magnético com aquecedor VELP para recuperar o líquido denso e ajustar sua densidade depois dos testes (Figura 28).

Figura 27. Evaporador rotatório e agitador magnético com aquecedor



Fonte: Compilação do autor

## 5. RESULTADOS

# 5.1. Caracterização

# 5.1.1. Análise Química

A análise química foi realizada para todas as amostras cabeça, suas respectivas frações granulométricas e produtos de líquido denso. A Tabela 7 abaixo contém as análises químicas das amostras cabeça.

Tabela 7. Análise quimica das amostras cabeça

r abeia 7. Analise quimica das amostras cabeça													
Amostras							Teor (	%)					
Amostras	Fet	FeO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	Р	Mn	S	Na₂O	K <sub>2</sub> O	LOI
MA-4388	26,51	3,05	62,00	0,23	0,03	0,09	0,04	0,012	0,011	<0,001	<0,005	0,005	-0,04
MA-4389	19,20	2,04	70,40	0,93	0,06	0,08	0,21	0,034	0,050	<0,001	0,007	0,023	0,63
MA-4390	12,58	1,74	82,10	0,17	0,03	0,05	<0,01	0,012	0,033	<0,001	<0,005	0,006	0,17
MA-4391	15,98	0,26	58,90	6,95	3,33	2,72	1,84	0,218	0,106	0,069	1,260	0,685	0,58
MA-4392	18,54	5,66	73,50	0,07	0,19	0,23	<0,01	0,010	0,024	0,004	<0,005	0,002	-0,34
MA-4394	19,10	1,33	72,70	0,10	0,21	0,25	<0,01	0,009	0,026	0,004	<0,005	0,005	-0,37
MA-4395	13,14	1,26	80,90	0,03	0,08	0,13	<0,01	0,007	0,014	<0,001	<0,005	0,001	-0,05
MA-4396	25,70	1,28	62,50	0,26	0,08	0,08	0,09	0,020	0,010	<0,001	<0,005	0,007	0,10
MA-4552	38,11	2,64	44,70	0,19	0,06	0,07	0,01	0,021	0,021	<0,001	<0,005	0,001	-0,26
MA-4553	40,96	3,74	40,90	0,15	0,06	0,03	<0,01	0,025	0,018	0,001	<0,005	<0,001	-0,27
MA-4554	38,57	2,25	43,60	0,13	0,09	0,03	<0,01	0,019	0,020	<0,001	<0,005	<0,001	-0,16
MA-4555	40,99	3,99	41,80	0,12	0,03	0,02	0,01	0,013	0,011	<0,001	<0,005	<0,001	-0,21
MA-4556	31,86	11,55	54,30	0,05	0,19	0,04	<0,01	0,014	0,016	<0,001	<0,005	<0,001	-0,96
MA-5137	36,88	13,90	46,00	0,88	0,51	0,60	0,16	0,038	0,028	<0,001	0,037	0,068	-1,17
MA-5247	33,42	1,23	50,40	0,65	0,07	0,17	0,15	0,023	0,006	<0,001	0,014	0,104	0,10
MA-5251	37,38	3,57	46,00	0,24	0,18	0,08	0,02	0,045	0,009	0,002	<0,005	0,009	-0,19
MA-5252	36,16	8,59	46,10	0,82	0,50	0,48	0,22	0,046	0,031	<0,001	0,050	0,073	-0,61
MA-5284	38,89	1,42	41,40	1,04	0,27	0,33	0,50	0,044	0,019	<0,001	0,028	0,157	0,30

A Figura 29 mostra os teores de ferro e sílica de cada amostra de furo de sondagem.

41



Figura 28. Teores de SiO2 e Ferro por amostra

Fonte: Compilação do autor

Como pode ser visto, amostras dos furos 82 e 83 (vindas de Mont Wright) e as de Fire Lake possuem teores de alimentação bem distintos. Elas foram divididas em 3 grupos diferentes com o propósito de melhor destacar suas características. Também pode ser visto que o furo 82 tem os maiores e menores teores de SiO<sub>2</sub> e Fe, respectivamente, na alimentação e maior variação nos valores.

A partir dos resultados da análise química foi traçada uma correlação entre os elementos do minério, que é apresentada na Figura 30.

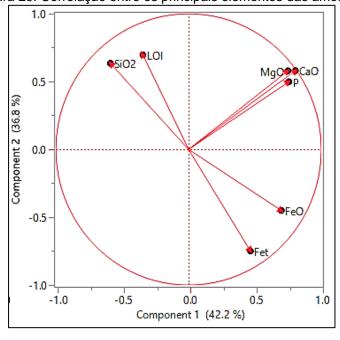


Figura 29. Correlação entre os principais elementos das amostras

Como pode ser notado, os teores de ferro e sílica têm uma correlação negativa. Outro ponto importante corresponde ao fato de que os contaminantes aparecem próximos uns dos outros, o que indica uma alta correlação positiva.

### 5.1.2. Análise Modal

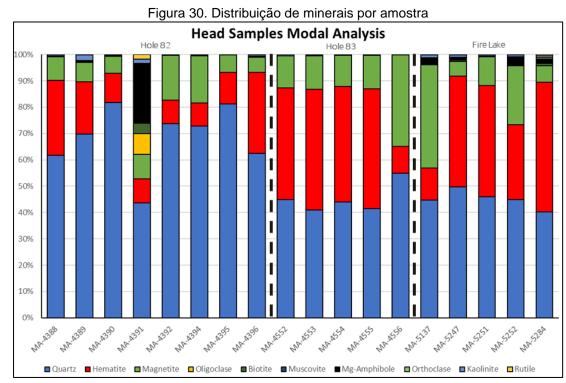
A Tabela 8, apresenta a análise modal das amostras cabeça.

Tabela 8. Análise modal das amostras cabeça

				Distrib	uição min	eralógica (%	<b>%</b> )			
Amostras	Magnetita	Oligoclásio	Biotita	Muscovita	Mg- Anfibolio	Ortoclásio	Caolinita	Rutilo	Hematita	Quartzo
MA-4388	9,09	0,01	0,02	0,00	0,28	0,00	0,45	0,04	28,44	61,66
MA-4389	7,34	0,00	0,12	0,00	0,44	0,05	2,10	0,21	19,76	69,16
MA-4390	6,56	0,01	0,03	0,00	0,24	0,00	0,30	0,01	11,15	81,83
MA-4391	9,09	7,69	3,82	0,00	21,76	0,42	1,51	1,80	9,06	42,55
MA-4392	17,00	0,02	0,01	0,00	0,14	0,00	0,07	0,01	8,89	73,39
MA-4394	17,91	0,01	0,02	0,00	0,28	0,00	0,12	0,01	8,73	72,51
MA-4395	6,64	0,05	0,00	0,00	0,08	0,00	0,01	0,01	11,91	80,83
MA-4396	5,80	0,00	0,03	0,00	0,31	0,00	0,51	0,09	30,69	62,11
MA-4552	12,02	0,05	0,00	0,00	0,08	0,00	0,42	0,01	42,03	44,44

MA-4553	12,61	0,05	0,00	0,00	0,08	0,00	0,31	0,01	45,50	40,69
MA-4554	11,50	0,05	0,00	0,00	0,08	0,00	0,26	0,01	43,24	43,41
MA-4555	12,61	0,05	0,00	0,00	0,08	0,00	0,24	0,01	45,55	41,62
MA-4556	34,30	0,05	0,00	0,00	0,08	0,00	0,06	0,01	10,05	54,21
MA-5137	38,84	0,00	0,41	0,01	2,11	0,02	1,14	0,15	12,11	44,40
MA-5247	5,66	0,00	0,48	0,33	0,66	0,10	0,84	0,14	41,72	49,32
MA-5251	10,85	0,00	0,06	0,00	0,32	0,00	0,45	0,02	42,15	45,63
MA-5252	5,58	0,00	0,36	0,00	3,00	0,00	0,66	0,22	45,35	44,39
MA-5284	6,19	0,00	0,79	0,00	1,69	0,41	0,80	0,49	48,78	39,74

Abaixo na Figura 31 é apresentada a distribuição de minerais por amostra.



Fonte: Compilação do autor

O gráfico mostra que amostras do furo 82 tem a mineralogia mais complexa e as do furo 83 a mais simples. As amostras de Fire Lake mostram presença de anfibolito em todas as amostras, sendo que a amostra MA-4391 apresenta a maior quantidade deste mineral.

A Figura 32 mostra que existe uma boa correlação entre rutilo, anfibólio de Mg, biotita e oligoclásio, indicando que estes minerais estão relacionados de alguma maneira.

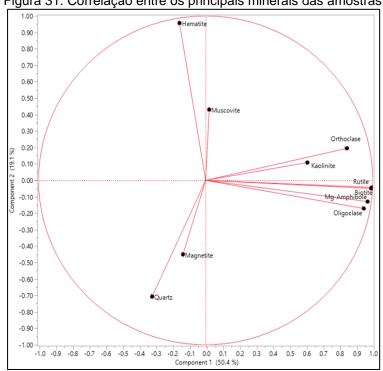


Figura 31. Correlação entre os principais minerais das amostras

Fonte: Compilação do autor

## 5.1.3. Densidade

Na Tabela 9 estão apresentadas as medições de densidade das amostras cabeça.

Tabela 9. Densidade das amostras cabeça

	3
Amostras	Densidade média (g/cm³)
MA-4388	3,24
MA-4389	3,05
MA-4390	2,92
MA-4391	3,06
MA-4392	3,07
MA-4394	3,06
MA-4395	2,96
MA-4396	3,22
MA-4552	3,58
MA-4553	3,76
MA-4554	3,71
MA-4555	3,79
MA-4556	3,39
MA-5137	3,67
MA-5247	3,56
MA-5251	3,73
MA-5252	3,64
MA-5284	3,75

A curva de correlação entre as medições de densidade e seus respectivos teores de ferro foi traçada e é apresentada na Figura 33.

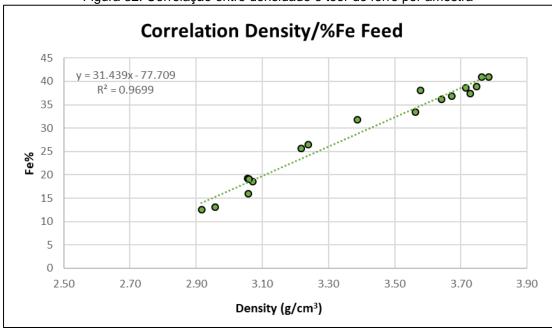


Figura 32. Correlação entre densidade e teor de ferro por amostra

Fonte: Compilação do autor

O índice R<sup>2</sup> mostra uma boa correlação e todas as amostras seguem a linha de tendência. Isso evidencia que a densidade é um bom preditor de teor de ferro para o minério de Mont Wright.

## 5.1.4. Size by Size

As distribuições granulométricas das amostras cabeça estão apresentadas na Figura 34.

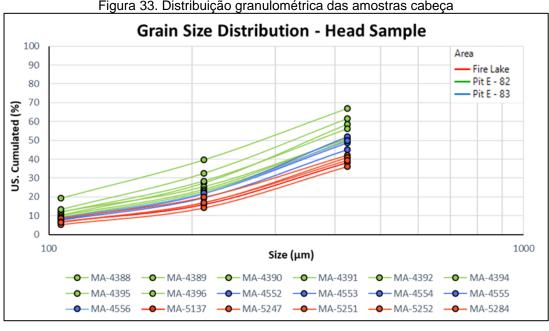
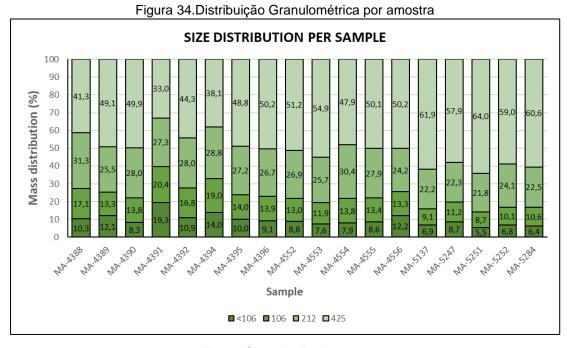


Figura 33. Distribuição granulométrica das amostras cabeça

Fonte: Compilação do autor

Neste gráfico pode ser observado que amostras de Fire Lake são mais grossas que as outras. As amostras do furo 83 apresentam granulometria intermediária e as do furo 82 são as mais finas.

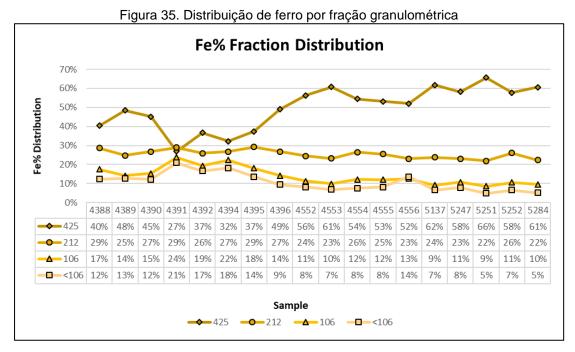
A Figura 35 mostra a distribuição de massa por fração granulométrica para todas as 18 amostras.



Fonte: Compilação do autor

A amostra MA-4391 corresponde ao material mais fino e as amostras dos furos 82 são as mais finas em média, tendo uma distribuição em massa de 12% na fração <106µm.

A distribuição de ferro por fração granulométrica está apresentada no gráfico da Figura 36.



Fonte: Compilação do autor

Pode ser observado que a distribuição de ferro diminui com o tamanho, seguindo a distribuição em massa, portanto, amostras mais grossas tendem a ter um teor de ferro mais alto.

### 5.1.5. Liberação

A Figura 37 e a Figura 38 apresentam, respectivamente, o grau de liberação dos óxidos de ferro e da ganga para 6 amostras que foram selecionadas para um estudo de liberação. Estas amostras foram selecionadas para representar as características principais das 18 amostras do grupo.

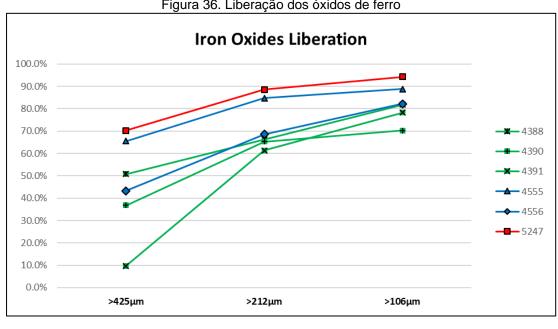


Figura 36. Liberação dos óxidos de ferro

Fonte: Compilação do autor

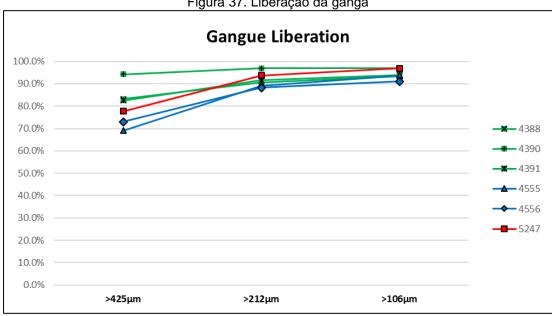


Figura 37. Liberação da ganga

Fonte: Compilação do autor

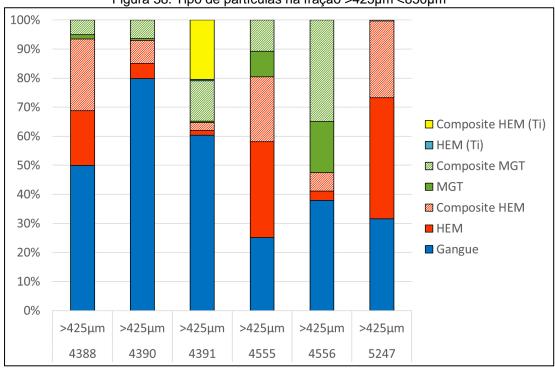
É possível observar que os óxidos de ferro estão menos liberados do que a ganga. As amostras de Fire Lake (vermelho) são as que possuem os óxidos de ferro mais liberados, seguidas pelas amostras do furo 83 (azul). As amostras do furo 82 (verde) são as que possuem a pior liberação dos óxidos de ferro. Com relação às partículas de ganga, amostras do furo 83 apresentam os menores graus de liberação.

As figuras 39, 40 e 41 apresentam a distribuição das partículas em cada fração granulométrica. A legenda dos termos usados nos gráficos é apresentada na Tabela 10.

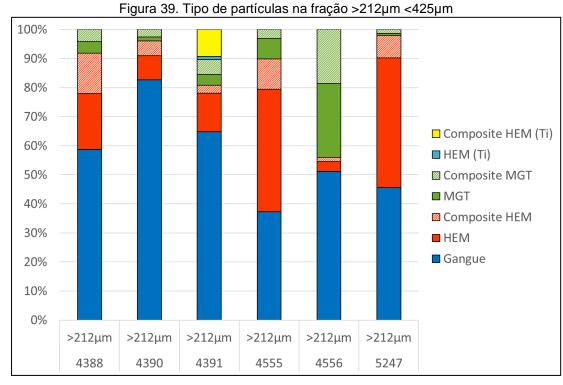
Tabela 10. Acrônimos da liberação

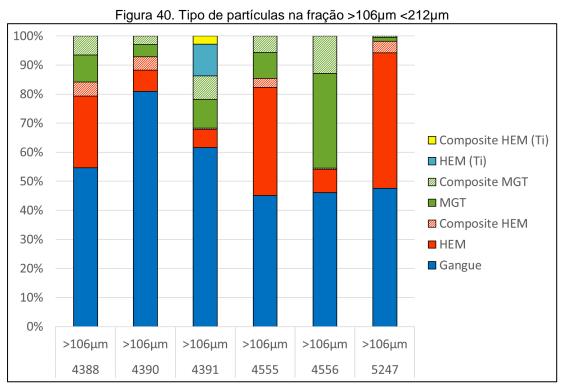
Acrônimo	Mineral
HEM	Hematita
MGT	Magnetita
HEM (Ti)	Hematita contaminada com Rutilo

Figura 38. Tipo de partículas na fração >425µm <850µm



Fonte: Compilação do autor





Fonte: Compilação do autor

# 5.2. Concentração

# 5.2.1. Líquido Denso

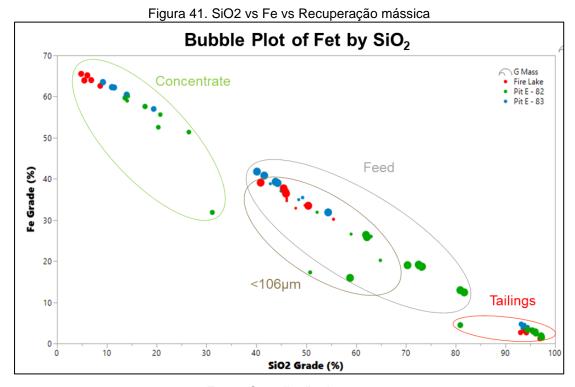
Os resultados dos testes de líquido denso são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Resultados dos testes de líquido denso

Tabela 11. Resultados dos testes de líquido denso  Distribuição do estágio  Tabela 17. Resultados dos testes de líquido denso											
American	Donaluta	(%)			Teor (%)						
Amostras	Produto	Massa	Fe	SiO <sub>2</sub>	Fet	FeO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Р	S	LOI
	Flutuado	100,0	100,0	100,0	24,91	1,79	64,38	0,16	0,011	0,00	0,13
MA-4388	Afundado	39,9	92,3	10,9	57,63	4,09	17,65	0,26	0,019	<0,001	-0,05
	Flutuado	60,1	7,7	89,1	3,20	0,26	95,40	0,10	0,006	<0,001	0,25
	Alimentação	100,0	100,0	100,0	18,77	1,14	71,14	0,55	0,034	0,00	0,53
MA-4389	Afundado	31,4	87,8	9,0	52,51	2,81	20,30	1,33	0,087	0,00	1,08
	Flutuado	68,6	12,2	91,0	3,34	0,38	94,40	0,20	0,010	<0,001	0,28
	Alimentação	100,0	100,0	100,0	11,65	0,87	82,82	0,10	0,013	0,00	0,37
MA-4390	Afundado	17,2	87,1	2,9	58,96	4,49	14,05	0,33	0,057	<0,001	0,80
	Flutuado	82,8	12,9	97,1	1,82	0,12	97,10	0,05	0,004	<0,001	0,28
	Alimentação	100,0	100,0	100,0	15,36	5,86	60,82	6,50	0,137	0,07	0,72
MA-4391	Afundado	40,0	82,8	20,3	31,77	11,30	30,90	8,37	0,257	0,16	0,25
	Flutuado	60,0	17,2	79,7	4,41	2,23	80,80	5,25	0,057	0,02	1,03
	Alimentação	100,0	100,0	100,0	17,17	4,16	75,37	0,09	0,008	0,00	-0,16
MA-4392	Afundado	29,4	88,1	10,3	51,44	12,65	26,30	0,15	0,016	0,01	-0,89
	Flutuado	70,6	11,9	89,7	2,90	0,62	95,80	0,06	0,005	<0,001	0,15
	Alimentação	100,0	100,0	100,0	17,82	4,58	74,41	0,07	0,008	0,00	-0,18
MA-4394	Afundado	28,3	88,3	7,9	55,64	14,35	20,70	0,13	0,016	0,01	-1,20
	Flutuado	71,7	11,7	92,1	2,90	0,72	95,60	0,04	0,005	<0,001	0,22
	Alimentação	100,0	100,0	100,0	12,10	1,07	82,05	0,02	0,004	0,00	0,17
MA-4395	Afundado	18,2	90,1	3,2	60,06	5,13	14,25	0,10	0,011	<0,001	-0,34
	Flutuado	81,8	9,9	96,8	1,46	0,17	97,10	<0,01	0,003	<0,001	0,28
	Alimentação	100,0	100,0	100,0	25,66	0,27	62,74	0,13	0,015	0,00	0,28
MA-4396	Afundado	40,4	94,3	8,8	59,84	0,53	13,60	0,20	0,026	<0,001	0,29
	Flutuado	59,6	5,7	91,2	2,46	0,09	96,10	0,09	0,007	<0,001	0,27

	Alimentação	100,0	100,0	100,0	38,93	2,73	44,75	0,19	0,018	0,00	0,00
MA-4552	Afundado	61,1	95,6	18,7	60,87	4,12	13,70	0,25	0,021	<0,001	-0,12
	Flutuado	38,9	4,4	81,3	4,41	0,54	93,60	0,09	0,012	<0,001	0,19
	Alimentação	100,0	100,0	100,0	42,07	2,84	39,99	0,14	0,020	0,00	0,01
MA-4553	Afundado	63,6	96,6	14,3	63,84	4,11	8,96	0,21	0,024	<0,001	-0,15
	Flutuado	36,4	3,4	85,7	3,96	0,63	94,30	0,03	0,012	<0,001	0,28
	Alimentação	100,0	100,0	100,0	39,36	2,41	44,17	0,13	0,012	0,00	-0,02
MA-4554	Afundado	59,9	95,1	15,5	62,51	3,64	11,40	0,19	0,015	<0,001	-0,21
	Flutuado	40,1	4,9	84,5	4,79	0,58	93,10	0,05	0,007	<0,001	0,27
	Alimentação	100,0	100,0	100,0	40,88	2,79	41,58	0,12	0,011	0,00	-0,05
MA-4555	Afundado	62,9	96,0	16,6	62,35	4,22	10,95	0,16	0,014	<0,001	-0,22
	Flutuado	37,1	4,0	83,4	4,43	0,37	93,60	0,04	0,007	<0,001	0,23
	Alimentação	100,0	100,0	100,0	30,94	10,20	55,62	0,05	0,014	0,00	-0,82
MA-4556	Afundado	51,2	94,1	17,9	56,88	18,85	19,40	0,09	0,019	<0,001	-1,80
	Flutuado	48,8	5,9	82,1	3,73	1,13	93,60	0,01	0,008	<0,001	0,21
	Alimentação	100,0	100,0	100,0	35,65	12,64	47,63	0,81	0,033	0,00	-0,97
MA-5137	Afundado	53,6	98,4	5,5	65,48	23,40	4,86	1,13	0,053	<0,001	-2,17
	Flutuado	46,4	1,6	94,5	1,21	0,22	97,00	0,43	0,010	<0,001	0,41
	Alimentação	100,0	100,0	100,0	33,57	0,32	50,32	0,66	0,020	0,00	0,33
MA-5247	Afundado	51,2	95,6	8,8	62,66	0,47	8,67	0,59	0,030	0,00	0,29
	Flutuado	48,8	4,4	91,2	3,06	0,17	94,00	0,74	0,010	<0,001	0,37
	Alimentação	100,0	100,0	100,0	37,88	2,50	45,19	0,22	0,038	0,00	-0,03
MA-5251	Afundado	56,1	96,5	7,4	65,19	4,27	5,95	0,31	0,053	<0,001	-0,25
	Flutuado	43,9	3,5	92,6	3,01	0,24	95,30	0,10	0,018	<0,001	0,25
	Alimentação	100,0	100,0	100,0	36,18	7,26	46,48	0,76	0,037	0,00	-0,52
MA-5252	Afundado	54,6	96,7	8,0	64,05	12,90	6,83	0,91	0,056	<0,001	-1,22
	Flutuado	45,4	3,3	92,0	2,63	0,46	94,20	0,57	0,015	<0,001	0,33
	Alimentação	100,0	100,0	100,0	39,36	0,30	40,56	0,92	0,036	0,00	0,46
MA-5284	Afundado	59,9	97,3	8,0	63,95	0,40	5,43	0,78	0,049	<0,001	0,44
	Flutuado	40,1	2,7	92,0	2,66	0,14	93,00	1,14	0,017	<0,001	0,50

A Figura 42 apresenta um gráfico de bolhas construído no software JUMP com a porcentagem de SiO<sub>2</sub> e Fe de todos os produtos. As cores indicam a localização e as bolhas representam a recuperação mássica.



Fonte: Compilação do autor

O gráfico mostra que os dados estão bem distribuídos com exceção de quatro pontos que estão deslocados, que correspondem a amostra MA-4391. Também é possível observar que os pontos de afundado são mais dispersos que os pontos que representam o flutuado. A maioria dessa dispersão é devido aos concentrados do furo 82 que apresentaram uma alimentação mais esparsa quanto ao teor de ferro e quanto a liberação.

Os rejeitos das amostras são muito similares o que está relacionado ao grau de liberação das gangas. Pode ser observado que o furo 83 tem o maior teor de ferro dos rejeitos. Provavelmente, isto é, por ele ter a pior liberação de ganga dentre as amostras.

Ao analisar o furo 83, pode ser observado que mesmo este possuindo teores de alimentação de ferro mais altos, não foi o furo que atingiu as melhores qualidades

de concentrado final, e sim Fire Lake. Isto é devido aos grãos de óxido de ferro de Fire Lake estarem melhor liberados do que os do furo 83.

Pode ser visto que nenhum concentrado atingiu a meta final (Tabela 1) (>66,3% Fe and <5% SiO<sub>2</sub>). Isso pode ser uma evidência que a densidade escolhida para os testes permitiu que as partículas mistas fossem arrastadas para o concentrado. A liberação dos grãos também pode ser relacionada ao fato de a meta não ter sido atingida. Isso pode ser melhorado com o uso de densidades mais altas. A recuperação mássica diminuiria, mas os teores de ferro seriam mais altos. Na usina isso pode ser resolvido alterando-se os parâmetros das espirais e enviando assim as partículas mistas para o rejeito.

Figura 42. Recuperação mássica geral das amostras

70.00

40.00

40.00

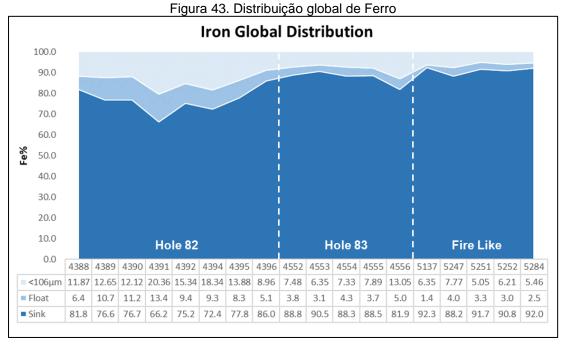
MA-4388 MA-4389 MA-4391 MA-392 MA-4394 MA-495 MA-4396 MA-4552 MA-4553 MA-4556 MA-5137 MA-5247 MA-5251 MA-5252 MA-5284

Na Figura 43 está apresentada a recuperação geral das amostras.

Fonte: Compilação do autor

O gráfico apresenta as recuperações mássicas, de ferro e de sílica. Era esperado que as amostras do furo 82 tivessem as piores recuperações mássicas, uma vez que elas apresentavam os piores teores na alimentação e as melhores liberações de ganga. As amostras do furo 83 atingiram melhores recuperações mássicas do que as amostras de Fire Lake. Isso é provavelmente porque elas carregaram mais quartzo para o afundado devido a um menor grau de liberação dos óxidos de ferro quando comparado com Fire Lake.

O gráfico da Figura 44 mostra a quantidade de ferro que foi destinada para a fração de 106µm, e para os produtos afundado e flutuado.



Pode ser visto que a amostra 4391 é a que destina a maioria do ferro para o rejeito e para os finos. Também é interessante observar que as amostras de Fire Lake apresentam a mais alta distribuição de ferro na porção afundada e os maiores teores de ferro no concentrado. Isso pode estar conectado ao fato de elas serem as amostras mais grossas e também as mais liberadas. As amostras de Fire Lake apresentam a menor distribuição de ferro no flutuado e nas frações mais finas.

### 5.2.2. Wrec

Os parâmetros encontrados na equação do Wrec são representados na Figura 45. O gráfico mostra os teores de SiO<sub>2</sub> e Fe e as bolhas representam a recuperação global de ferro.

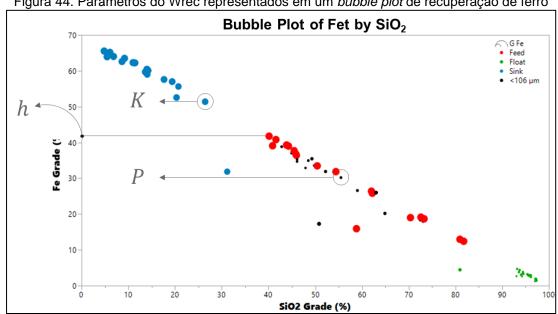


Figura 44. Parâmetros do Wrec representados em um bubble plot de recuperação de ferro

A Tabela 12 abaixo apresenta os valores de Wrec calculados.

Tabela 12. Valores do Wrec e seus parâmetros

Amostra	K	Р	h	Rw	Fet
MA-4388	81,8	11,9	26,4	34,3	57,6
MA-4389	76,6	12,7	19,0	22,8	52,5
MA-4390	76,7	12,1	12,4	14,9	59,0
MA-4391	66,2	20,4	15,9	16,5	31,9
MA-4392	75,2	15,3	18,7	22,2	51,4
MA-4394	72,4	18,3	19,1	22,0	55,6
MA-4395	77,8	13,9	12,9	16,0	60,1
MA-4396	86,0	9,0	25,8	35,3	59,7
MA-4552	88,8	7,5	39,0	55,1	60,4
MA-4553	90,5	6,4	41,8	60,2	63,5
MA-4554	88,3	7,3	39,3	55,2	62,2
MA-4555	88,5	7,9	40,8	57,5	62,3
MA-4556	81,9	13,1	31,9	41,7	57,0
MA-5137	92,3	6,4	36,8	54,4	65,5
MA-5247	88,2	7,8	33,5	47,0	62,6
MA-5251	91,7	5,0	37,7	54,9	65,2
MA-5252	90,8	6,2	36,4	52,7	64,0
MA-5284	92,0	5,5	39,1	57,3	63,9

Os valores utilizados para obter o Wrec são o resultado de um balanço de massa realizado no software BILCO. Abaixo na Tabela 13 está a comparação entre os valores de Wrec encontrados com o balanço do BILCO e os experimentais usando a planilha de cálculo do COREM. Como pode ser visto os valores apresentam variações muito pequenas.

Tabela 13. Comparação com o balanço do BILCO

Amostra	Rw BILCO	Rw	Rw - Rw BILCO
MA-4388	34,3%	34,0%	-0,3%
MA-4389	22,8%	23,1%	0,2%
MA-4390	14,9%	15,0%	0,2%
MA-4391	16,5%	16,4%	-0,1%
MA-4392	22,2%	21,7%	-0,5%
MA-4394	22,0%	21,7%	-0,3%
MA-4395	16,0%	16,1%	0,2%
MA-4396	35,3%	34,9%	-0,4%
MA-4552	55,1%	53,3%	-1,8%
MA-4553	60,2%	58,8%	-1,5%
MA-4554	55,2%	53,9%	-1,2%
MA-4555	57,5%	57,5%	0,0%
MA-4556	41,7%	41,5%	-0,2%
MA-5137	54,4%	54,3%	0,0%
MA-5247	47,0%	46,8%	-0,2%
MA-5251	54,9%	54,5%	-0,4%
MA-5252	52,7%	52,1%	-0,5%
MA-5284	57,3%	57,1%	-0,2%

Na Figura 46 abaixo está representado um gráfico contendo os valores de Wrec por amostra:

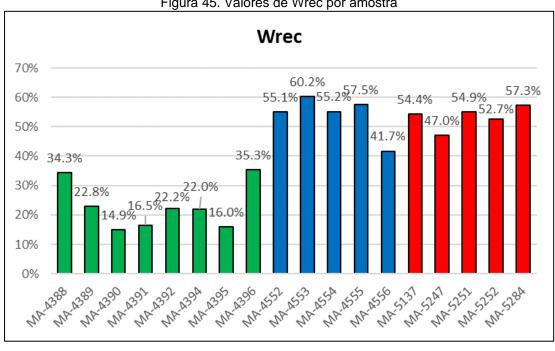


Figura 45. Valores de Wrec por amostra

Fonte: Compilação do autor

O furo 83 apresenta os valores mais altos de Wrec, exceto pela amostra 4556. Isso pode ser justificado quando observamos a liberação desta amostra. Ela tem a liberação dos óxidos de ferro parecida com as do furo 82, que são as amostras menos liberadas.

Abaixo na Figura 47 está apresentado um gráfico de teor de alimentação vs valores de Wrec.

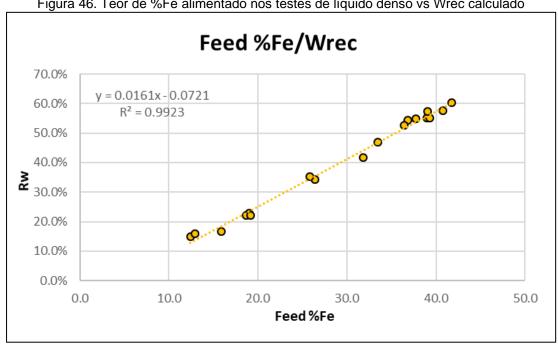


Figura 46. Teor de %Fe alimentado nos testes de líquido denso vs Wrec calculado

Pode ser observado que o gráfico gerado não apresenta discrepâncias. Até mesmo a amostra MA-4391, que era considerada uma outlier, segue a linha de tendência proposta.

A Figura 48 abaixo apresenta as correlações entre recuperação mássica nos testes de líquido denso e a liberação de óxidos de ferro para cada fração.

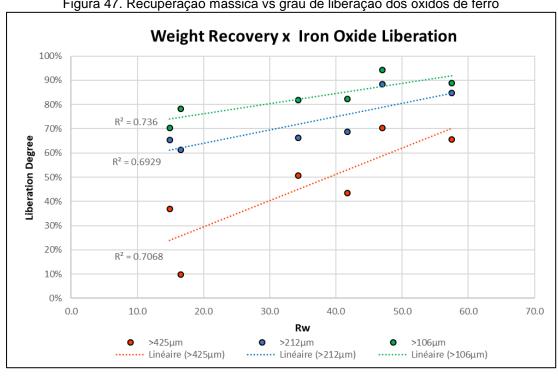


Figura 47. Recuperação mássica vs grau de liberação dos óxidos de ferro

Pode ser observado que o índice R<sup>2</sup> cresce com a granulometria devido a maior distribuição de ferro nas frações mais grossas.

Na tentativa de evidenciar como a liberação influência na concentração do processo e buscando encontrar um fator que possa ser usado como preditor para o grau de liberação, uma correlação foi traçada entre a razão de concentração do Fe global (considerando os furos como alimentação e o concentrado do líquido denso) e a liberação da ganga na fração >425 µm. A Tabela 14 apresenta cinco das seis amostras que foram analisadas para liberação. A amostra MA-4390 foi excluída por estar abaixo do teor de corte na mina de Mont Wright (15%).

Tabela 14. Razão de concentração e liberação da ganga

Amostras	h (%)	Fet no concentrado do liquido denso (%)	Ganga Lib°	Razão de Conc.
MA-4388	26,4	57,6	83%	2,2
MA-4391	15,9	31,9	83%	2,0
MA-4555	40,8	62,3	69%	1,5
MA-4556	31,9	57,0	73%	1,8
MA-5247	33,5	62,6	78%	1,9

Na Figura 49 está apresentado um gráfico de razão de concentração vs grau de liberação na fração mais grossa.

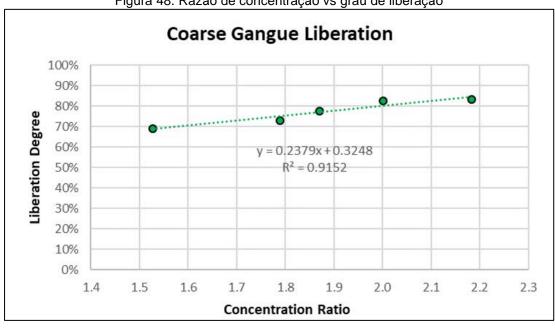


Figura 48. Razão de concentração vs grau de liberação

Fonte: Compilação do autor

Pode ser observado que a curva foi construída com apenas alguns pontos, mas aparentemente mostra uma boa correlação. Visto isso, se feita com mais amostras, a razão de concentração pode ter potencial para ser usado como um preditor de liberação para o minério de Mont Wright no procedimento do Wrec caso os resultados apresentem um comportamento similar.

### 6. CONCLUSÃO

Com relação a este trabalho, a caracterização mostrou resultados extensos. Os testes de líquido denso realizados com as 18 amostras levaram a bons resultados. Todas as amostras foram caracterizadas e tiveram seu Wrec calculado. A liberação foi observada como um fator-chave na análise da eficiência do processo, explicando praticamente todos os resultados de recuperação e qualidade. Também foi observada uma boa correlação entre a razão de concentração e o grau de liberação da ganga.

As amostras de furos de sondagem se mostraram bem distintas. Quando os furos são analisados separadamente, foram observadas características similares que podem diferenciar os furos 82, 83 e os de Fire Lake como sendo de três grupos diferentes.

Amostras do furo 82 foram, mineralogicamente, as mais complexas e apresentaram os piores graus de liberação e de teores de Fe. Elas também apresentaram uma granulometria mais fina, destinando a maior porcentagem de massa para a fração <106µm. Isso reflete no fato de elas terem os piores valores de Wrec e de teor de ferro final.

O furo 83 apresentou os melhores teores de Fe na alimentação e a mineralogia mais simples. Isso, entretanto não trouxe os melhores resultados de concentrado (as amostras de Fire Lake apresentaram os melhores graus de liberação e os teores finais mais altos). As amostras do furo 83 apresentaram os valores de Wrec mais altos, devido a partículas mistas no concentrado. Apesar disso, as amostras de Fire Lake apresentaram melhor qualidade no concentrado. Elas também apresentaram uma granulometria mais grosseira, destinando quase nenhuma massa para as porções finas.

Foi observado que a distribuição de% Fe está direta e positivamente correlacionada com a distribuição de tamanho, aumentando junto com ela. O teor de ferro confirmou ter uma boa correlação com a densidade e aparentemente existe também uma boa correlação entre a razão de concentração e o grau de liberação da ganga. Isso deve ser melhor explorado com um maior número de testes.

Considerando o que foi exposto acima, o melhor cenário de qualidade para as expirais deve ser amostras grossas, como as de Fire Lake e do furo 83. É esperado que elas tenham uma melhor performance por apresentarem menor perda para finos e maiores distribuições de ferro em frações grossas. Em adição, como uma conclusão global, quanto mais alto o grau de liberação mais alto será o teor final dos produtos, o que mostra que a liberação é o ponto chave no processo de concentração, como esperado.

### 7. BIBLIOGRAFIA

- ARCELORMITTAL. (2012). Sobre a ArcelorMittal Canadá: Mining sites (Mont-Wright and Fire Lake). Acesso em 2019, disponível em Site Transformerlavenir: https://www.transformerlavenir.com/en/facilities/amemfacilities/mining-sites-mont-wright-and-fire-lake/
- Bennett, R. L. (1971). Prediction of Mount Wright concentrator performance from tests on drill cores Application to mine planning.
- Bottoso, N. (2019). Effect of mineralogy on grinding energy of Mont-Wright iron ore.

  UNIVERSITY OF LIÈGE ULIÈGE, UNIVERSITY OF LORRAINE UL,

  LULEA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY LTU.
- Brodeur-Grenier, A. (2018). ANALYSE STRUCTURALE DE LA MINE DE MONT-WRIGHT DE LA PROVINCE DE GRENVILLE ORIENTALE, FERMONT, QUÉBEC. École Polytechnique de Montréal, Fermont.

COREM. (2016).