

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA,
MATERIAIS E DE MINAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

FLOTAÇÃO DIRETA DE MINÉRIO
DE FERRO ITABIRÍTICO

Autor: Paulo Penha Santana

Orientador: Professor Paulo Roberto de Magalhães Viana

Belo Horizonte, Janeiro/2012.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Paulo Penha Santana

FLOTAÇÃO DIRETA DE MINÉRIO DE FERRO ITABIRÍTICO

Dissertação de mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica, Materiais e de Minas da
Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Tecnologia Mineral
Orientador: Professor Paulo Roberto de
Magalhães Viana

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2012

“Não basta conquistar a sabedoria, é preciso usá-la.”
Cícero

Dedico esta obra a meu pai, minha mãe e ao meu irmão Cílio pela permanente e incansável ajuda e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar força e coragem a cada dia para vencer mais este desafio.

Agradeço à Gerdau Açominas, pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos e incentivadores Tiago Claret Santiago e Antônio Eduardo Clark Peres.

A minha amiga e incentivadora Juliana Cristina Freitas.

Ao Hiller Geraldo Vieira Araujo e Ricardo de Paula Reis pelo apoio.

Ao meu filho Paulo Victor Santana pela compreensão da minha ausência e apoio.

Às minhas irmãs e irmãos, Ana Maria, Girlene, Dalva, Carla, José Remígio, Ildefonso, Geraldo e Edir por entenderem a minha ausência durante esse tempo e nunca me deixarem desistir.

À mãe do meu filho Edlaine Aparecida Cândido Santana pelo apoio e compreensão.

.

Aos professores George Eduardo Sales Valadão, Armando Corrêa de Araujo, Paulo Roberto Gomes Brandão, Roberto Galéry e Rísia Magriotis Papini.

Ao Renato Luiz Rodrigues pelo apoio e troca de idéias.

Agradeço também à Cidinha e ao Célio pela ajuda e constante apoio.

Ao meu orientador Paulo Roberto de Magalhães Viana pela paciência e disponibilidade em ensinar para realizar um bom trabalho.

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	25
2 – OBJETIVOS	28
2.1 – Objetivo geral	28
2.2 – Objetivos específicos	28
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
3.1 – Ferro	29
3.1.1 – Introdução	29
3.1.2 - Óxidos, oxihidróxidos e hidróxidos de ferro	32
3.1.3 - Geologia e geoquímica	34
3.2 – Minério de ferro	39
3.2.1 – Introdução	39
3.2.2 – Reservas mundiais e brasileiras de minério de ferro	39
3.2.3 – Quadrilátero Ferrífero	41
3.3– Processamento de minérios de ferro	45
3.3.1 – Flotação catiônica reversa de minérios de ferro	47
3.3.2 – Deslamagem de minérios de ferro	55
3.3.3 – Flotação direta de minério de minério de ferro	61
4 - METODOLOGIA	64
4.1. Composição e preparação das amostras	64
4.2. Caracterização da amostra	65
4.2.1. Análise granulométrica	65
4.2.2. Análise química.	66
4.2.3. Microscopia ótica de luz refletida por faixa de tamanho	66
4.2.4. Testes tecnológicos	66
4.2.4.1 Testes de flotação em célula mecânica de laboratório	66

4.2.5. Testes Experimentais de Deslamagem e Flotação-----	67
4.2.5.1. Testes em Escala de Bancada.-----	67
5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES -----	74
5.1. Massa específica-----	74
5.2. Análises químicas e granulométricas-----	74
5.3. Análise mineralógica e grau de liberação.-----	75
5.4. Resultados dos testes experimentais de flotação.-----	76
5.4.1. Resultados dos testes em escala de bancada utilizando ácido oléico-----	76
5.4.2. Resultados dos testes em escala de bancada utilizando OGVI - óleo graxo vegetal industrial.-----	79
5.4.3. Resultados dos testes em escala de bancada utilizando flotin F-S 1-----	83
5.4.4. Resultados dos testes em escala de bancada utilizando flotin FS-2-----	87
5.4.5. Resultados dos testes em escala de bancada utilizando óleo de pinho-----	91
5.4.6. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 3,5, variando os tipos de reagentes coletores-----	95
5.4.7. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 5,0, variando os tipos de reagentes coletores-----	99
5.4.8. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 6,0, variando os tipos de reagentes coletores-----	104
5.4.9. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 7,0, variando os tipos de reagentes coletores-----	107
5.4.10. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 8,0, variando os tipos de reagentes coletores-----	112
5.4.11. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 10,0, variando os tipos de reagentes coletores-----	115

5.4.12. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 7,0, utilizando o coletor ácido oléico na dosagem de 300 g/talimentação , variando a rotação-----	120
5.4.13. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 7,0, utilizando o coletor ácido oléico na dosagem de 300 g/talimentação , variando a % de sólidos no condicionamento -----	124
5.4.14. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 7,0, utilizando o coletor ácido oléico na dosagem de 300 g/talimentação , variando o tempo de condicionamento -----	128
5.4.15. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 7,0, utilizando o coletor ácido oléico na dosagem de 300 g/talimentação , variando a dosagem do reagente espumante-----	132
5.4.16. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 7,0, utilizando o coletor ácido oléico na dosagem de 300 g/talimentação , variando a dosagem do reagente dispersante-----	136
5.4.17. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 7,0, utilizando o coletor ácido oléico na dosagem de 300 g/talimentação , variando a dosagem do reagente depressor-----	140
5.4.18. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 7,0, utilizando o coletor ácido oléico, variando a dosagem do mesmo --	144
5.4.19. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 7,0, utilizando o coletor ácido oléico, realizando etapas de limpeza no concentrado-----	148

6- CONCLUSÕES -----	153
----------------------------	------------

7- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS -----	154
8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	155

LISTA DE FIGURAS

1.1 – Exportações brasileiras de bens primários de ferro (IBRAM ,2012)-----	26
3.1 – Esquema do interior da terra (WIKIPEDIA, 2012)-----	29
3.2 – Produção de minério de ferro no mundo versus produção de minério de ferro no Brasil (IBRAM ,2012)-----	40
3.3 - Distribuições das reservas de minério de ferro no Brasil (adaptado de QUARESMA, 2001). -----	41
3.12 – Possíveis efeitos de partículas muito finas na flotação (KLASSEN & MOKROUSOV, 1963 apud ARAUJO, 1982). -----	52
3.13 – Aumento da área superficial devido à diminuição do tamanho da partícula (TURRER, 2004). -----	53
3.22 - Efeito das lamas na flotação catiônica reversa de minério de ferro da mina de Alegria (RABELO, 1992). -----	57
3.23 - Teor de SiO ₂ no concentrado e recuperação metálica na flotação x pH de dispersão na deslamagem. -----	60
4.1 – Fluxograma de preparação da amostra.-----	64
4.2 - Fluxograma de caracterização para a amostra de itabirito utilizada nos ensaios de flotação em laboratório-----	65
4.3 - Célula de flotação utilizada nos testes em escala de bancada-----	70

4.4 – Conjunto de cubas que podem ser utilizadas na célula de flotação modelo CFB 10000N de fabricação da Engendrar com destaque para a cuba de 700 cm ³ de volume útil-----	70
5.4 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente ácido oléico na dosagem de 300 g/t _{alimentação} , para avaliação da influência do pH-----	77
5.5 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente ácido oléico na dosagem de 300 g/t _{alimentação} , para avaliação da influência do pH-----	78
5.6 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente ácido oléico na dosagem de 300 g/t _{alimentação} , para avaliação da influência do pH-----	79
5.7 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente OGVI - óleo graxo vegetal industrial na dosagem de 300 g/t _{alimentação} , para avaliação da influência do pH-----	81
5.8 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente OGVI - óleo graxo vegetal industrial na dosagem de 300 g/t _{alimentação} , para avaliação da influência do pH-----	82
5.9 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente OGVI - óleo graxo vegetal industrial na dosagem de 300 g/t _{alimentação} , para avaliação da influência do pH-----	83

- 5.10 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente flotin FS - 1 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH-----85
- 5.11 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente flotin FS - 1 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH-----86
- 5.12 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente flotin FS - 1 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH-----87
- 5.13 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente flotin FS-2 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH-----89
- 5.14 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente flotin FS-2 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH-----90
- 5.15 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente flotin FS-2 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH-----91
- 5.16 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente óleo de pinho na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH-----93

- 5.17 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente óleo de pinho na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH-----94
- 5.18 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente óleo de pinho na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH-----95
- 5.19 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 3,5 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor-----97
- 5.20 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 3,5 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor-----98
- 5.21 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 3,5 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor-----99
- 5.22 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 5,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor-----101
- 5.23 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 5,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor-----102
- 5.24 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 5,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor-----103

- 5.25 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 6,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor-----105
- 5.26 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 6,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor-----106
- 5.27– Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 6,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor-----107
- 5.28 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor-----109
- 5.29 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor-----110
- 5.30 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor-----111
- 5.31 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 8,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor-----113
- 5.32 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 8,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor-----114

- 5.33 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 8,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor-----115
- 5.34 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 10,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor-----117
- 5.35 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 10,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor-----118
- 5.36 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 10,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor-----119
- 5.37 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da rotação -----121
- 5.38 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0 utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da rotação-----122
- 5.39 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da rotação -----123
- 5.40 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da % de sólidos --125

- 5.41 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0 utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da % de sólidos --126
- 5.42 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da rotação -----127
- 5.43 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tempo de condicionamento -----129
- 5.44 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0 utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tempo de condicionamento-----130
- 5.45 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação do tempo de condicionamento -----131
- 5.46 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da dosagem do reagente espumante -----133
- 5.47 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0 utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da dosagem do reagente espumante -----134

- 5.48 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da dosagem do reagente espumante -----135
- 5.49 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da dosagem do reagente dispersante -----137
- 5.50 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0 utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da dosagem do reagente dispersante -----138
- 5.51 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da dosagem do reagente dispersante -----139
- 5.52 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da dosagem do reagente depressor -----141
- 5.53 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da dosagem do reagente depressor -----142
- 5.54 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da dosagem do reagente depressor -----143

- 5.55 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na para avaliação da influência da dosagem do mesmo -----145
- 5.56 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0 utilizando ácido oléico para avaliação da influência da dosagem do mesmo -----146
- 5.57 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico para avaliação da dosagem do mesmo -----147
- 5.58 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na para avaliação das etapas de limpeza do concentrado -----150
- 5.59 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0 utilizando ácido oléico para avaliação das etapas de limpeza do concentrado -----151
- 5.60 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico para avaliação das etapas de limpeza do concentrado -----152

LISTA DE TABELAS

3.1 - Abundância relativa dos principais elementos da crosta terrestre até uma profundidade teoricamente minerável de 5 km (adaptado de JONES, 1987). -----	31
3.2 - Principais óxidos e oxihidróxidos de ferro (SCHWERTMANN & CORNEL, 1991). -----	32
3.3- Principais características dos óxidos hidróxidos de ferro.-----	33
3.4 - Principais características de formações ferríferas bandadas (adaptado de ERIKSSON, 1995). -----	38
3.5 - Coluna estratigráfica do Pré-Cambriano no Quadrilátero Ferrífero (modificado de ENDO, 1988). -----	43
3.6 – Principais tipos de depósitos e suas características de formação (modificado de DORR II, 1964). -----	44
3.7 - Classificação dos minérios de ferro de Itabira (adaptado de DORR & BARBOSA, 1963). -----	45
3.20 – Perdas de seletividade do processo de flotação devido à presença de lamas (SOUZA & de ARAUJO, 1999). -----	56
3.21 – Desempenho da flotação de quartzo na presença de espécies minerais de diferentes faixas granulométricas (SOUZA & de ARAUJO, 1999). ---	56
3.22 – Teores da alimentação da flotação em função do pH de dispersão na deslamagem (SILVA, 1994)-----	60

3.23 - Flotação de minérios de ferro usando ácido oleico, e oleato de sódio como coletores.(QUAST, 1999) -----	62
5.1 - Resultados da determinação da massa específica do material-----	74
5.2 – Resultados das análises químicas (global e por faixa)-----	74
5.3 – Resultados das análises mineralógicas (global e por faixa) e grau de liberação-----	75
5.4 – Resultados dos testes de flotação, utilizando como coletor ácido oléico para avaliação da influência do pH-----	76
5.5 – Resultados dos testes de flotação, utilizando como coletor OGVI - óleo graxo vegetal industrial para avaliação da influência do pH-----	80
5.6 – Resultados dos testes de flotação, utilizando como coletor flotin FS - 1 para avaliação da influência do pH-----	84
5.7 – Resultados dos testes de flotação, utilizando como coletor flotin FS-2 para avaliação da influência do pH-----	88
5.8 – Resultados dos testes de flotação, utilizando como coletor óleo de pinho para avaliação da influência do pH-----	92
5.9 – Resultados dos testes de flotação em pH 3,5, variando os tipos de coletores-----	96
5.10 – Resultados dos testes de flotação em pH 5,0, variando os tipos de coletores-----	100
5.11 – Resultados dos testes de flotação em pH 6,0, variando os tipos de coletores-----	104

5.12 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, variando os tipos de coletores-----	108
5.13 – Resultados dos testes de flotação em pH 8,0, variando os tipos de coletores-----	112
5.14 – Resultados dos testes de flotação em pH 10,0, variando os tipos de coletores-----	116
5.15 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, variando a rotação-----	120
5.16 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, variando a % de sólidos no condicionamento dos testes de flotação-----	124
5.17 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, variando o tempo de condicionamento nos testes de flotação-----	128
5.18 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, variando a dosagem do reagente espumante flotanol D 25 nos testes de flotação-----	132
5.19 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, variando a dosagem do reagente hexametáfosfato de sódio nos testes de flotação-----	136
5.20 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, variando a dosagem do reagente silicato de sódio nos testes de flotação-----	140
5.21 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, variando a dosagem do mesmo nos testes de flotação-----	144

- 5.22 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, variando as etapas de limpeza no concentrado dos testes de flotação-----148
- 5.23 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, etapa *rougher*-----148
- 5.24 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, etapa *rougher / cleaner 1*-----148
- 5.25 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, etapa *rougher / cleaner 1 / cleaner 2*-----149
- 5.26 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, etapa *rougher / cleaner 1 / cleaner 2 / cleaner 3*-----149
- 5.27 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, etapa *rougher / cleaner 1 / cleaner 2 / cleaner 3 / cleaner 4*-----149

RESUMO

O presente trabalho avaliou a flotação direta de hematita em testes de bancada com a fração -150 μ m natural de um minério itabirítico de baixo teor de ferro (26,0%) do Quadrilátero Ferrífero. Os reagentes coletores investigados foram o ácido oléico, óleo graxo vegetal industrial, flotin FS-1, flotin FS-2 em diferentes condições de pH. O trabalho considerou ainda a investigação da ação de silicato de sódio como depressor de ganga e de dois reagentes comerciais como espumante e dispersante respectivamente. Outras variáveis investigadas foram a dosagem e tempo de condicionamento dos reagentes e a agitação e porcentagem de sólidos na flotação. Após a realização de testes preliminares que objetivaram estabelecer as melhores condições da flotação, o uso de ácido oléico de forma isolada, sem depressor ou espumante, foi selecionado para a otimização dos resultados. O concentrado *rougher*, obtido nos testes finais, foi submetido a diversas etapas de limpeza de tal forma que para duas etapas *cleaner* obteve-se um índice de seletividade Gaudin de 31,2, com teor de sílica no concentrado de 1,67%, teor de ferro no rejeito de 3,77% e uma recuperação de ferro de 90,85%. Para três etapas de limpeza do concentrado *rougher* obteve-se um índice de seletividade de Gaudin de 40,0, teor de sílica no concentrado de 0,95%, teor de ferro no rejeito de 4,04% e uma recuperação de ferro de 90,09%. Os resultados obtidos neste estudo de flotação direta de minério de ferro itabirítico de baixo teor, com a utilização de ácido oléico como coletor, mostram a plena viabilidade de se obter concentrados adequados tanto para alto forno quanto para fornos de redução. O índice de seletividade da flotação foi muito elevado tendo como consequência uma recuperação de ferro superior à recuperação de ferro obtida na flotação catiônica reversa. Este resultado, além de mostrar de forma convincente a viabilidade técnica para flotação direta de minérios de ferro do quadrilátero ferrífero, indica também um grande potencial para redução dos custos operacionais da flotação.

ABSTRACT

The present work has evaluated the hematite direct flotation, through bench scale tests, with the natural - 150 μ m fraction of an itabiritic ore of low iron content (26.0%) from the iron quadrangle in Minas Gerais, Brasil. The collecting reagents in the investigation were the oleic acid and an industrial vegetal oil and the commercial reagents Flotin FS-1 and Flotin - FS-2. The work considered the investigation of sodium silicate action as gangue depressor and two commercial reagents as a frother and dispersing respectively. Other investigated variables were the reagents dosage and time of conditioning and also the agitation intensity and pulp solids percentage during the flotation. After the accomplishment of the preliminary tests that targeted to establish the flotation best conditions, the use of oleic acid without the addition of a frother or a depressor, was selected for the results optimization. The rougher concentrate produced in the final tests was submitted to several cleaner stages in such a way that, for two cleaner stages, a Gaudin selectivity index of 31.2 was achieved. The silica content in the concentrate was 1.67%, the iron content in the tailings was 3.77% and the iron recovery was 90.85%.for three cleaner stages a Gaudin selectivity index of 40.0 was achieved. The silica content in the concentrate was 0.95, the iron content in the tailings was 4.04% and the iron recovery was 90.09%. These final results show the viability of producing adequate concentrates for blast furnaces as well as direct reduction concentrates. The high flotation selectivity index had as a consequence a superior iron recovery. This result demonstrates the technical viability for the direct flotation of low iron content ores occurring in the iron quadrangle region and also indicates a great potential for the flotation operational costs reduction.

1. INTRODUÇÃO

A indústria de extração e beneficiamento de minério de ferro é uma atividade totalmente dependente da produção e do consumo de aço. A siderurgia é, seguramente, a maior compradora deste insumo. Estima-se que 98% das vendas de minério de ferro são direcionadas à indústria siderúrgica. Nesse sentido, as perspectivas de desempenho do setor siderúrgico constituem-se, tradicionalmente, no principal elemento norteador do nível de atividade da extração de minério de ferro (IBRAM, 2012).

O Brasil é um dos líderes na produção e exportação de minério de ferro. O forte crescimento econômico da China e a recuperação do nível de atividade industrial dos EUA causaram a dinamização do comércio internacional e a elevação do consumo de produtos transformados de aço, contribuindo para um excelente desempenho do setor mineral no Brasil e particularmente na área de minério de ferro, que passou por uma expansão nas vendas para os mercados interno e externo, entre 2000 e 2010. As exportações brasileiras de bens primários de Ferro em 2010 atingiram 311 milhões de toneladas, com um valor FOB de US\$ 16 bilhões. Isso representa um aumento de 17% em quantidade e de 119% no valor das exportações em comparação com 2009. Na figura 1.1, pode ser visualizado as exportações brasileiras de bens primários de ferro (IBRAM, 2012).

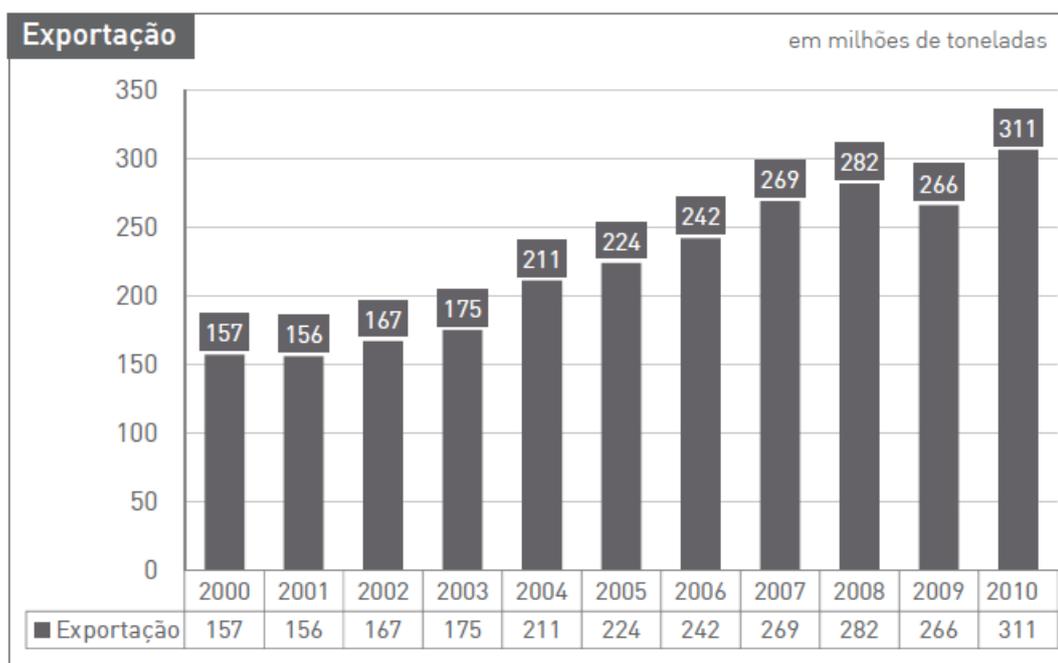


Figura 1.1 – Exportações brasileiras de bens primário de ferro (IBRAM, 2012).

Dado às crescentes exigências sócio-ambientais nos cenários interno e mundial, tanto as usinas siderúrgicas integradas quanto as mini-usinas siderúrgicas vêm promovendo investimentos em melhoria tecnológica e cobrando melhores insumos da indústria mineral, visando produtos de melhor qualidade, com menores custos e reduzidos efeitos negativos ao meio ambiente.

Os fatos relatados denotam a necessidade da busca cada vez maior de produção e qualidade do minério de ferro, porém os minérios existentes nos depósitos estão cada vez mais complexos e com menor teor em ferro, dado à necessidade de melhor aproveitamento das reservas. Essa situação antagônica urge investimentos em pesquisa e desenvolvimento tecnológico para assegurar a manutenção da competitividade e, até mesmo, a sobrevivência das empresas dedicadas à exploração e tratamento do minério de ferro, em um cenário de competição global.

Inserido nesse contexto técnico-econômico, o processo de flotação catiônica reversa de ganga (geralmente minerais da classe dos silicatos e principalmente

o quartzo), através da depressão seletiva dos óxidos de ferro, mostra-se consolidado como o mais comumente utilizado para o tratamento dos itabiritos, o minério de ferro mais abundante no Brasil.

Um dos parâmetros mais utilizados para aferir o desempenho desse processo é a recuperação metalúrgica. Sua maximização é de vital importância para o aumento do lucro do empreendimento mineral, para a elevação da vida útil da reserva e das bacias de descarte de rejeito.

O tratamento de minérios cada vez mais complexos, com menores teores de ferro e presença também de outros contaminantes como: carbonatos, anfibólios e outros silicatos e crescentes taxas de alimentação para compensar as menores recuperações em massa decorrentes dessa queda de teores, têm ocasionado quedas na recuperação metalúrgica nas usinas de concentração das empresas, cujo fator preponderante é a perda de partículas ultrafinas de minerais de ferro no flotado, por arraste ou flotação verdadeira.

Vale ressaltar que as maiores reservas de minérios de ferro a serem lavradas terão altos teores de contaminantes (quartzo, carbonatos, anfibólios e outros silicatos) e baixo teor do elemento ferro, por isto, teoricamente, a flotação direta do elemento ferro será bastante vantajosa.

Estes fatos demonstram a relevância do presente trabalho no sentido de investigar novos reagentes e rotas de processo no tratamento de minérios de ferro de baixo teor.

2. OBJETIVOS

2.1- Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo efetuar estudos de flotação direta de minério de ferro itabirítico contendo baixo teor de ferro, visando a obtenção de concentrados que atendam as especificações de mercado.

2.2- Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- i. Caracterizar amostra de minério de ferro itabirítico com baixo teor de ferro de forma a identificar sua composição química e mineralógica;
- ii. Fazer testes de flotação direta em bancada com a amostra de minério caracterizada usando diferentes tipos de reagentes;
- iii. Verificar a possibilidade de estabelecimento de uma rota para a flotação direta efetivamente seletiva para o beneficiamento de minérios de ferro itabiríticos contendo baixo teor de ferro.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Ferro

3.1.1. Introdução

O núcleo da Terra é composto basicamente de níquel e ferro e representa cerca de 17% do volume de nosso planeta. A porção externa do núcleo é fluida e fica a cerca de 5.155km da superfície da Terra. A parte sólida do núcleo encontra-se a cerca de 6.371km de profundidade e apresenta temperaturas estimadas entre 2.000 e 5.000°C. Uma outra parte denominada por manto é composta principalmente de oxigênio, ferro, silício e magnésio e forma 82% do volume da Terra. Entre o manto e o núcleo existe uma região chamada de descontinuidade de Gutenberg. Entre o manto e a camada externa, denominada crosta terrestre existe uma região denominada Moho. A crosta terrestre tem cerca de 0,6% do volume total do planeta e é constituída, principalmente, por silício e magnésio em sua porção interna e silício e alumínio em sua porção externa (POPP, 1984). Na figura 3.1, pode ser visualizado um esquema do interior da terra (WIKIPEDIA, 2012).

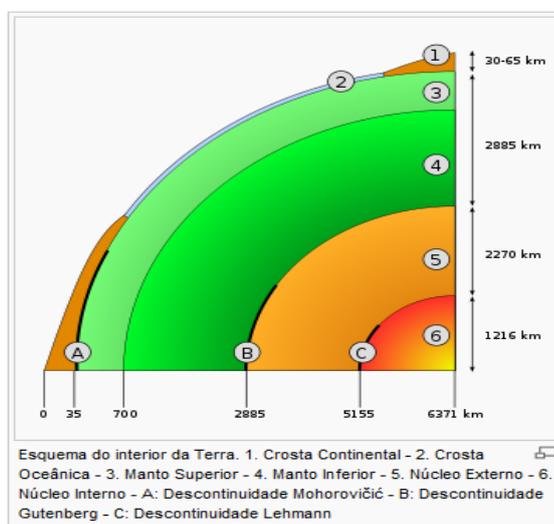


Figura 3.1 – Esquema do interior da terra (WIKIPEDIA, 2012).

O ferro é bastante abundante em nosso planeta. De fato, o ferro (Fe) é um elemento químico que, em termos globais, responde por mais de 36% em massa da constituição da Terra, sendo o elemento mais abundante do planeta. Entretanto, assim como ocorre com a densidade, a massa de ferro decresce, do manto para a crosta, e na crosta continental a abundância de ferro é expressivamente menor. Considerando-se, todavia, que apenas os 5km mais superficiais da crosta podem ser minerados (pelo menos no estágio atual da tecnologia), a proporção de ferro é mais uma vez reduzida.

Na crosta continental, dois outros elementos químicos são mais abundantes que o ferro: o silício (27,2% do total) e o oxigênio (45,2% do total), sendo que este último se encontra intimamente associado aos demais elementos químicos e, em especial, ao silício na forma de compostos químicos naturais – os minerais da família dos silicatos (POPP, 1984).

Em termos de profundidade teoricamente acessível à mineração (cerca de 5 km), as abundâncias relativas dos principais elementos químicos são mostrados na Tabela 3.1. Observa-se que pouco se alteram as abundâncias do silício e do oxigênio. O alumínio, porém, passa a ser o terceiro elemento mais abundante, acima do ferro.

Tabela 3.1 – Abundância relativa dos principais elementos da crosta terrestre até uma profundidade teoricamente minerável de 5 km (adaptado de JAMES, 1973).

Elemento Químico	Símbolo	Abundância Média (% em peso)	Massa Aproximada (toneladas)
Oxigênio	O	46,60	$4,6 \times 10^{18}$
Silício	Si	27,72	$2,7 \times 10^{18}$
Alumínio	Al	8,13	$8,0 \times 10^{17}$
Ferro	Fe	5,00	$4,9 \times 10^{17}$
Cálcio	Ca	3,63	$3,6 \times 10^{17}$
Sódio	Na	2,83	$2,8 \times 10^{17}$
Potássio	K	2,59	$2,5 \times 10^{17}$
Magnésio	Mg	2,09	$2,1 \times 10^{17}$
Titânio	Ti	0,44	$4,3 \times 10^{16}$
Fósforo	P	0,10	$9,8 \times 10^{15}$
Manganês	Mn	0,19	$8,8 \times 10^{15}$
Total Acumulado		99,22	$9,7 \times 10^{18}$

O ferro metálico é maleável e dúctil, tem densidade específica de $7,87 \text{ g/cm}^3$ e, comparado a outros metais, é um fraco condutor de eletricidade. É facilmente magnetizável em temperaturas baixas, porém sua magnetização torna-se difícil com seu aquecimento, até que em 790°C ocorre o desaparecimento dessa propriedade, graças à transformação de ferro- α em ferro- β (CRISTIE & BRATHWAITE, 1997).

A ocorrência de ferro nativo (α -Fe) é rara, sendo encontrado somente em meteoritos e como raros grãos ou massas associadas com rochas basálticas (uma exceção notável é Disko Island, na Groenlândia, onde as massas de ferro nativo podem atingir várias toneladas (KLEIN & HURLBUT, 1999). Normalmente, o ferro ocorre associado a dióxido de carbono, oxigênio, enxofre ou silício formando carbonatos, óxidos, sulfetos e silicatos, respectivamente.

3.1. 2. Óxidos, Oxihidróxidos e Hidróxidos de Ferro

Até hoje, são conhecidos, na natureza, treze óxidos, oxihidróxidos e hidróxidos de ferro. Os mais importantes estão listados na Tabela 3.2. Além deles, existem, ainda, $\text{Fe}(\text{OH})_2$, β - Fe_2O_3 , ε - Fe_2O_3 e FeOOH de alta pressão. Todos os óxidos e oxihidróxidos consistem de Fe, O e/ou OH, diferindo em composição, na valência do Fe e, acima de tudo, na estrutura cristalina (SCHWERTMANN & CORNEL, 1991).

Tabela 3. 2 – Principais óxidos e oxihidróxidos de ferro (SCHWERTMANN & CORNEL, 1991).

Oxihidróxidos		Óxidos	
Fórmula	Mineral	Fórmula	Mineral
α - FeOOH	Goethita	α - Fe_2O_3	hematita
β - FeOOH	Akaganeíta	γ - Fe_2O_3	maghemita
γ - FeOOH	Lepidocrocita	Fe_3O_4	magnetita
δ - FeOOH	Ferroxihita		
$\text{Fe}_5\text{HO}_8\text{4H}_2\text{O}$	Ferrhidrita		

Hematita, Martita, Magnetita e Goethita

DANA (1976) e RAMDOHR, (1980), descreve os dados gerais dos principais óxidos e oxihidróxidos de ferro, do ponto de vista do beneficiamento de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero, destacam-se os seguintes minerais: hematita e martita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4) e goethita (FeO.OH), as principais características destes oxihidróxidos de ferro, podem ser vista na tabela 3.3.

Tabela 3.3- Principais características dos óxidos hidróxidos de ferro.

Nome	Hematita e Martita	Magnetita	Goethita
Fórmula Química	Fe_2O_3	Fe_3O_4	FeO.OH
Densidade	4,9 a 5,3 g/cm ³	5,18	
Densidade do Cristal	5,26 g/cm ³	5,18 g/cm ³	4,37 g/cm ³
Dureza	5,5 a 6,5	6,0	5,0 a 5,5
Cor	Castanho avermelhada a preto	Preto	Castanho amarelado a acastanho escuro
Brilho	Metálico	Metálico	Adamantino a opaco
Traço	Vermelho acastanhado	Preto	Castanho amarelado
Composição	70,0 % Fe e 30,0 % O	72,4 % Fe e 27,6 % O	62,9 % Fe, 27,0 % O e 10,1 % H ₂ O
Comportamento na microscopia de luz refletida	Muito brilhante e branca, em comparação com sulfetos amarelos, e especialmente com o ouro, a hematita aparece embaçada e muito mais azul-acinzentada, quando em contrastes normais. (RAMDOHR, 1980).	A reflectividade é moderada; a primeira impressão de cor é um cinza, com tonalidades variáveis de marrom claro (RAMDOHR, 1980).	A cor e os valores da refletividade variam bastante, dependendo do polimento, porosidade, tamanho de grão, etc. (DERR et al, 1977; RAMDOHR, 1980).

3.1.3. Geologia e Geoquímica

As formações ferríferas distribuídas por todo o mundo pertencem as idades pré-cambriana e fanerozóica. No período pré-cambriano são encontradas as formações ferríferas bandadas (BIF's – Banded Iron Formations) que correspondem a intercalações de camadas centimétricas de minerais de ferro e sílica na forma de “*chert*” ou sílica recristalizada (quartzo). O período fanerozóico apresenta formações ferríferas Ironstones. As formações ferríferas bandadas (BIF's) possuem larga distribuição e aproveitamento econômico, enquanto as formações ferríferas Ironstones apresentam menor importância econômica (EVANS, 1987; JAMES, 1973).

Formações ferríferas bandadas (BIF's) recebem diversas denominações em diferentes regiões da terra, como itabirito no Brasil, jaspelito na Austrália, quartzito ferruginoso nas antigas repúblicas soviéticas, taconitos na América do Norte, etc. O grande volume dessas formações ferríferas do proterozóico foi depositado em curto espaço de tempo geológico, de 2,6 a 1,8 bilhões de anos. (EVANS, 1987; GODICH, 1973).

Segundo JAMES (1954), o máximo da deposição dos BIF's no proterozóico resultou da combinação de fatores estruturais, geoquímicos e biológicos. Segundo ele, a formação das bacias de sedimentação dos BIF's ocorreu da seguinte forma: do arqueano até o início do proterozóico, os oceanos, em equilíbrio com uma atmosfera fraca em oxigênio (ambiente anóxico), constituíram um grande reservatório para a dissolução de ferro e silício, derivados de várias fontes (incluindo vulcanismo e intemperismo), isto é, o ferro ferroso estava solúvel na água do mar. Durante o potente processo de subducção, a litosfera do oceano sofreu falhas e fraturas, através das quais a água do mar acessou e lixiviou hidrotermalmente as camadas aquecidas do fundo. A era da orogênia e cratonização foi seguida de um longo período de estabilidade da crosta, durante o qual os blocos continentais foram reduzidos a superfícies de baixo relevo, tendo com isso níveis fracos de introdução de

material clástico nas bacias de sedimentação. Durante o proterozóico inferior (período dos crátons ¹), os distúrbios estruturais foram fracos e responsáveis pelo desenvolvimento de calhas intracontinentais e bacias marginais rasas. As águas profundas do mar, ricas em nutrientes, ocuparam as calhas intracontinentais recém-formadas, iniciando uma série de eventos, incluindo o rápido crescimento e evolução da biota. Alguns desses seres vivos foram geradores de oxigênio e responsáveis pela precipitação de ferro e silício. Durante o dia, sob a ação da luz solar, o ferro era oxidado para hidróxido férrico, que ao precipitar carregava com ele alguma sílica coloidal. O precipitado $\text{Fe}(\text{OH})_3 - \text{SiO}_2$ atingiu o fundo da bacia em pulsos, com o $\text{Fe}(\text{OH})_3$ mais denso expulsando o composto SiO_2 mais leve para cima. Assim, formou-se uma camada rica em óxido e outra rica em sílica. A deposição das BIF's no final daquela era cessou, devido à oxigenação da atmosfera e água do mar, que produziu a camada filtrante de ozônio em torno da terra e também causou a extinção de microrganismos marinhos anaeróbios. A natureza dos precipitados de ferro dependeu das condições locais. As bacias rasas e abertas produziram fácies oxidadas, enquanto que, em bacias e calhas profundas, as condições favorecem as fácies silicatadas, carbonatadas e sulfetadas, cujas formações não requerem excesso de oxigênio.

O conteúdo em ferro primário sedimentar dos episódios acima citados foi afetado por processos posteriores de metamorfismo e oxidação, que dificultam o reconhecimento das litologias primárias. De acordo com a visão clássica desenvolvida por VAN HISE & LEITH (1911) apud JAMES (1954), as formações ferríferas primárias consistem de precipitação química de carbonato de ferro e "chert", com abundante presença de silicatos de ferro, em algumas áreas. Os vulcanismos são considerados fonte importante de ferro para o ambiente marinho, através de reações entre lavas submarinas e a água do mar, e de contribuição direta por meio de emanações gasosas e líquidas (JAMES, 1954). Associa-se a origem da sílica a vulcanismos ácidos.

¹ *Crátons*: são blocos da crosta que atingiram estabilidade ao longo do tempo e que devido a sua relativa rigidez experimentaram somente deslocamentos verticais.

Os processos fundamentais de enriquecimento das BIF's são os seguintes (MORRIS, 1985; JAMES, 1973; GARRELS et al, 1973):

- (i.) intemperismo: constitui o processo de enriquecimento supergênico, onde soluções aquosas frias (meteóricas) removem silicatos (chert ou quartzo) e/ou carbonatos (dolomita) da formação ferrífera, deixando apenas as bandas porosas de minerais de ferro. Esse processo forma os minérios supergênicos ou marrons, que são constituídos de minerais de granulação fina com graus de hidratação diferentes;
- (ii.) metamorfismo / metassomatismo: processo de enriquecimento metassomático, em que soluções hidrotermais trocam o chert (ou quartzo) por óxido de ferro, formando uma rocha compacta muito rica em ferro. Forma os minérios metassomáticos ou azuis, constituídos, principalmente, por hematita de granulação progressivamente crescente (2 a 2000 μ m) com o grau de metamorfismo, que pode ser estabelecido pela presença de minerais como cloritas, micas, anfibólios e outros, e também pelo tamanho dos grãos de chert ou quartzo.

Essas formações ocorrem em diferentes ambientes deposicionais, sendo o ambiente marinho reconhecidamente o mais favorável. Além disso, podem ser agrupadas, de acordo com o ambiente deposicional, em três tipos principais (GARRELS et al, 1973; JAMES & SIMS, 1973.):

- (i.) *Tipo Algoma*: Apenas 2% das BIF's são desse tipo. Sua sedimentação ocorreu durante o Arqueano, aproximadamente entre 3,2 e 2,6 bilhões de anos, época caracterizada pelo crescimento continental (ERIKSSON, 1995). Destacam-se as formações de Yilgam, na Austrália; da Província de Wyoming, nos Estados Unidos; do Zimbábwe, na África;
- (ii.) *Tipo Lago Superior*: Os principais depósitos de minério de ferro do mundo são originários dessas formações do período proterozóico, aproximadamente entre 2,6 e 2,0 bilhões de anos. É responsável por 92% de todas as BIF's existentes. O proterozóico caracterizou-se por

mares epicontinentais, nos quais foram depositados sedimentos ricos em minerais de ferro e em sílica (ERIKSSON, 1995). Corresponde atualmente às BIF's de Pilbara, na Austrália; Transvaal-Griquatown, na África do Sul; Lago Superior, nos Estados Unidos; Labrador, no Canadá; Carajás (Formação Carajás) e Quadrilátero Ferrífero (Formação Cauê), no Brasil;

- (iii.) O terceiro tipo corresponde a 6,0% das BIF's, que foram formadas por precipitação em condições glaciais no final do proterozóico. Um exemplo são as jazidas de Urucum (Mato Grosso do Sul - Brasil).

As diferentes fácies das formações ferríferas ocorrem de acordo com o ambiente sedimentar em que se encontram. A espécie do mineral de ferro precipitado é dependente das condições de pH e Eh do ambiente; em ambientes marinhos normais os valores de pH e Eh situam-se, respectivamente, em 8,4 e + 0,4V, nas áreas próximas à superfície e 7,5 e - 0,4V, em maiores profundidades. As variações das condições do ambiente de deposição conduzem à distinção de quatro fácies de formações ferríferas, em função da mineralogia dessas formações (JAMES, 1973):

- (i.) *Óxido* – dependendo do óxido de ferro dominante, pode ser separada em subfácies hematita e subfácies magnetita, ocorrendo uma gradação entre ambas; esta fácies possui um conteúdo médio de ferro de 30-35% e os minérios de ferro passíveis de exploração são aqueles associados a essas fácies;
- (ii.) *Carbonato* – consiste em camadas de *chert* e siderita intercaladas; a gradação para a fácies óxido ocorre pela presença de magnetita-siderita-quartzo ou pirita-siderita-quartzo para a fácies sulfeto; seu conteúdo médio de ferro está entre 25-30%;
- (iii.) *Silicato* – silicatos de ferro associados à magnetita, siderita e *chert* em camadas alternadas; seu conteúdo médio de ferro está entre 25-30%;

- (iv.) *Sulfeto* – consiste em argilitos carbonosos piríticos, com bandamento devido à concentração de pirita em certas camadas; o conteúdo desse mineral é da ordem de 37%.

As diferenças entre os tipos *Algoma* e *Lago Superior*, com relação à distribuição faciológica, amplitude espacial, idade geológica, importância econômica e associações são mostradas na tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Principais características de formações ferríferas bandadas (adaptado de ERIKSSON, 1995).

FORMAÇÕES FERRÍFERAS DO TIPO ALGOMA	FORMAÇÕES FERRÍFERAS DO TIPO LAGO SUPERIOR
Idade geológica arqueana	Idade geológica proterozóica
Associação com rochas vulcânicas e grauvacas.	Associação com quartzitos, folhelhos carbonosos, conglomerados, dolomitos, cherts e argilitos.
Fácies óxido, carbonato e sulfeto.	Fácies óxido, carbonato e silicato.
Espessura centimétrica a métrica.	Espessura métrica.
Extensão de poucos Km	Extensão de muitos Km
Textura laminar.	Textura laminar.
Economicamente menos importantes.	Economicamente importantes.

3.2. Minério de ferro

3.2.1. Introdução

O termo minério de ferro é utilizado com uma ampla gama de significados, dificultando a compreensão da finalidade de seu uso. Foi utilizado inicialmente na petrografia como sinônimo de minerais acessórios opacos, ocorrendo a sua utilização também como uma alternativa para minerais como a hematita e a magnetita e como sinônimo para formações ferríferas em geral (MORRIS, 1985). Partindo da premissa de que minério é uma definição basicamente econômica, controlada por questões políticas, tecnológicas e de infraestrutura, dentre outras (EVANS, 1987), o termo minério de ferro deveria ser utilizado, preponderantemente, referindo-se a um agregado de minerais que está sendo ou poderá vir a ser explorado com vantagem econômica devido ao seu conteúdo de ferro.

3.2.2 – Reservas mundiais e brasileiras de minério de ferro

As reservas mundiais (medidas e indicadas) de minério de ferro são estimadas em aproximadamente 330 bilhões de toneladas. As maiores reservas estão localizadas na Ucrânia, Rússia e China, totalizando aproximadamente 170 bilhões de toneladas, ou seja, cerca de 50% do total mundial. Austrália e Brasil ocupam, respectivamente, o quarto e o quinto lugares nesse *ranking*, baseado apenas na massa de minério. Contudo, quando se considera o conteúdo de ferro das reservas, a classificação dos países se altera. A China perde posição, passando para o quarto lugar, em virtude do baixo teor de Fe de seu minério (cerca de 30%). Por outro lado, a Austrália passa a ocupar a terceira posição, devido ao alto teor de Fe de seu minério (cerca de 62,5%). O Brasil, mesmo continuando na quinta posição, com 6,8% das reservas, ocupa um lugar de destaque no cenário mundial (JESUS, 2004).

No ritmo atual de produção, o Brasil é o segundo maior produtor de Minério de Ferro. Sua produção em 2010 foi de 372 milhões de toneladas, o que equivale a 15% do total mundial (2,4 bilhões de ton.), ficando atrás apenas da Austrália. A China, considerando o teor o minério extraído do seu território, é a quarta maior produtora com 300 milhões de toneladas. Na figura 3.2, é mostrado a produção de minério de ferro no mundo versus a produção de minério de ferro no Brasil de 2000 a 2010.

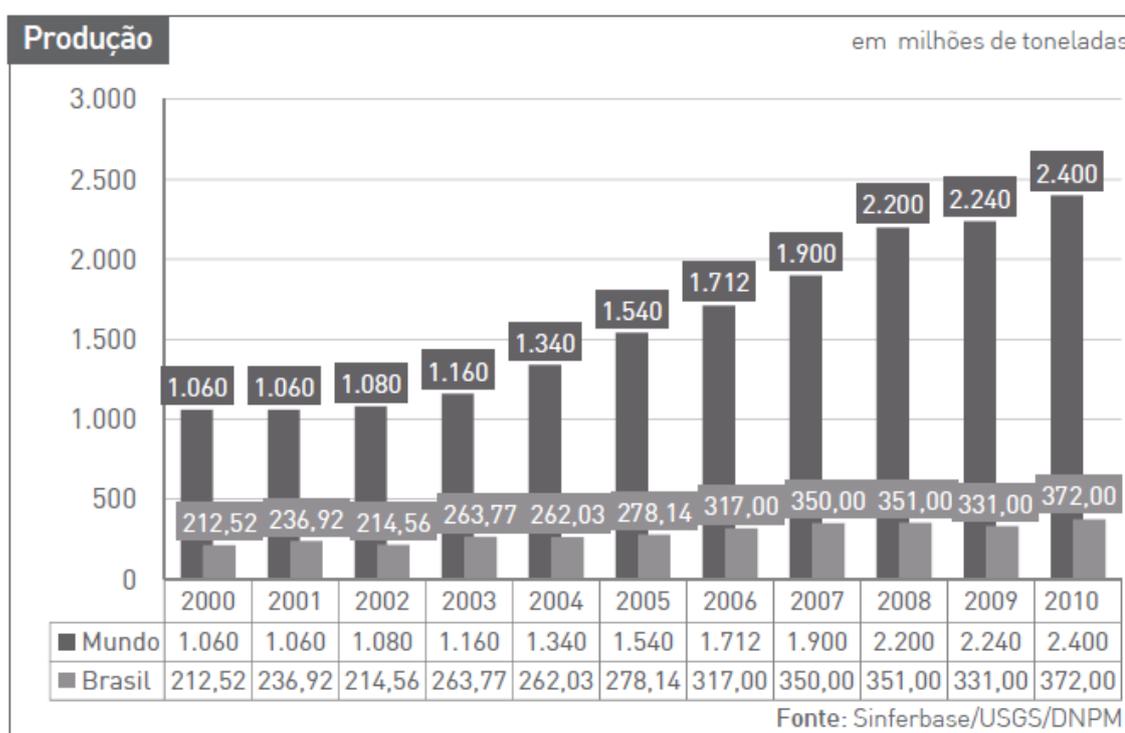


Figura 3.2 – Produção de minério de ferro no mundo Versus produção de minério de ferro no Brasil (IBRAM 2011).

As reservas brasileiras de minério de ferro encontram-se fortemente concentradas nos estados de Minas Gerais e Pará. Além desses, Mato Grosso do Sul e São Paulo completam a lista dos estados com reservas dignas de nota. Na figura 3.3 é apresentada a distribuição das reservas brasileiras de minério de ferro (QUARESMA, 2001).

Em Minas Gerais, as reservas e a produção concentram-se na região denominada como Quadrilátero Ferrífero, porção central do Estado; no Pará,

na Serra de Carajás; no Mato Grosso do Sul, nos municípios de Corumbá e Ladário, na porção noroeste do estado, região do Pantanal Sul-Matogrossense, na fronteira com a Bolívia. Considerando-se essas três regiões onde o minério de ferro é extraído e beneficiado, observam-se algumas diferenças entre os teores médios de ferro contido. No chamado Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, que respondeu por quase toda a produção de minério de ferro até 1986, o teor médio alcança 55% de ferro contido; na Serra de Carajás, no Pará, 65% de ferro contido; na região de Corumbá, no Mato Grosso do Sul, esse teor médio contido alcança 60% (QUARESMA, 2001).

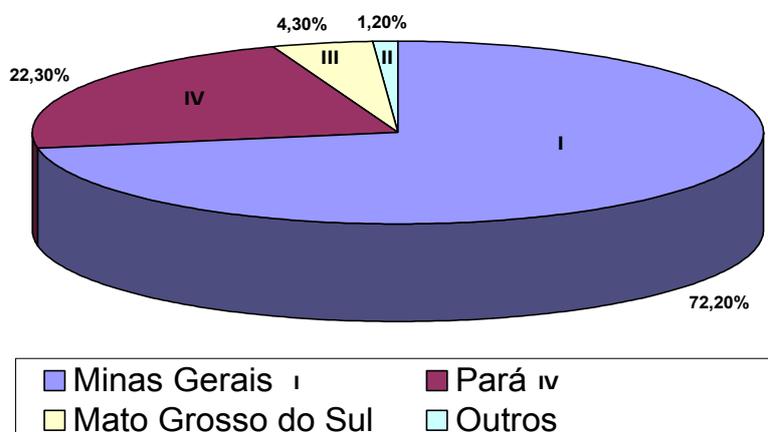


Figura 3.3 – Distribuição das reservas de minério ferro no Brasil (adaptado de QUARESMA, 2001).

3.2.3. Quadrilátero Ferrífero

O Quadrilátero Ferrífero compreende uma área de aproximadamente 7.000 km², na porção central do Estado de Minas Gerais, e constitui uma das áreas clássicas da geologia pré-cambriana do mundo. Segundo DORR II (1959), o Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais foi assim denominado devido aos vastos depósitos de minério de ferro que ocorrem numa área limitada aproximadamente pelas linhas que ligam Itabira, Rio Piracicaba, Mariana, Congonhas do Campo, Casa Branca e Itaúna.

A geologia do Quadrilátero Ferrífero é bastante complexa e existem no mínimo três séries de rochas sedimentares separadas por discordâncias principais. As rochas da área encontram-se dobradas, falhadas e foram metamorfasadas em graus variáveis (DORR II, 1959). Do ponto de vista geotectônico, está inserido na Província São Francisco, situando-se no extremo sul do Cráton de mesmo nome e corresponde a um fragmento crustal polpado, em parte, da Orogênese Brasileira (ALMEIDA, 1977; ALMEIDA E HASSUY, 1984). O Cráton do São Francisco é, em grande parte, resultado do retrabalhamento em eventos posteriores de um maior e mais antigo núcleo estável, denominado Cráton Paramirim, de idade pré-transamazônica. Durante o evento Brasileiro foram geradas faixas de dobramento que hoje margeiam e definem a forma do Cráton do São Francisco (ALMEIDA, 1981).

As unidades litoestratigráficas que compõem o Quadrilátero Ferrífero são: o Embasamento Cristalino (Complexos Metamórficos), o Supergrupo Rio das Velhas, o Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi (DORR II, 1969). Na tabela 3.5 está esquematizada a coluna geológica padrão para o Quadrilátero Ferrífero.

Tabela 3.5 – Coluna estratigráfica do Pré-Cambriano no Quadrilátero Ferrífero (modificado de ENDO, 1988).

Grupo Itacolomi		
Supergrupo Minas	Grupo Piracicaba	Formação Sabará
		Formação Barreiro
		Formação Taboões
		Formação Fecho do Funil
		Formação Cercadinho
	Grupo Itabira	Formação Gandarela
		Formação Cauê
	Grupo Caraça	Formação Batatal
		Formação Moeda
	Grupo Tamanduá	Sem nome
Formação Cambotas		
Supergrupo Rio das Velhas	Grupo Maquiné	Formação Casa Forte
		Formação Palmital
	Grupo Nova Lima	Unidade Clástica Metassedimentar
		Unidade Química Metassedimentar
		Unidade Metavulcânica
Embasamento Cristalino		

Segundo DORR II (1964) existem seis tipos gerais de jazidas de importância comercial em Minas Gerais e cada tipo produz um minério de natureza diferente. A tabela 3.6 apresenta os principais tipos de depósitos e suas características de formação.

Tabela 3.6 – Principais tipos de depósitos e suas características de formação. (modificado de DORR II, 1964).

Tipo	Nome do depósito	Característica de formação
I	Depósitos hipogênicos de substituição	Formados pela substituição do quartzo dos itabiritos por óxidos de ferro.
II	Depósitos supergênicos de substituição	Formados pela substituição do quartzo e outros minerais do itabirito pelo ferro trazido por soluções frias originárias da superfície da terra.
III	Depósitos de enriquecimento residual	Formados pela lixiviação supergênica de rochas ricas em ferro, tais como o itabirito, através de soluções frias originárias na superfície da terra, pode produzir minérios de médio teor e alguns de alto teor
IV	Minério detrítico ou coluvial	É um depósito superficial de hematita compacta, normalmente de poucos metros de espessura, derivado das jazidas dos tipos I, II e ou III.
V	Corpos de minérios residuais	Formados por blocos de Hematitas compacta, devido à grande resistência da mesma.
VI	Canga:	Os depósitos de canga podem ser originados da combinação de um ou mais dos processos anteriores (com exceção dos depósitos hipogênicos de substituição).

Várias classificações foram propostas para os minérios de ferro encontrados no Quadrilátero Ferrífero. A classificação apresentada na tabela 3.7, proposta por

DORR (1964), estabeleceu de forma mais abrangente a tipologia dos minérios de Itabira e foi adaptada para todo o Quadrilátero Ferrífero.

Tabela 3.7 – Classificação dos minérios de ferro de Itabira (adaptado de DORR, 1964).

Hematita de alto teor	Dura
	Intermediária
	Mole
Minério Friável	
Canga	
Itabirito	

3.3. Processamento de minérios de ferro

Os fatores determinantes para a adoção dos fluxogramas de processamento dos minérios de ferro podem ser divididos, de uma maneira genérica, em fatores intrínsecos e extrínsecos ao minério a ser processado. Como fatores intrínsecos ao minério, pode - se considerar as características físico-químicas do *ROM (run of mine)*: a distribuição granulométrica, a granulometria de liberação das partículas minerais, os teores químicos e as associações mineralógicas. Como fatores extrínsecos ao minério, as características físico-químicas desejadas para o seu transporte e destinação nas etapas metalúrgicas subseqüentes, como, por exemplo, aglomeração (briquetagem, sinterização e pelotização), redução em alto-forno ou processos de redução direta, ditarão os quesitos de qualidades físicas, químicas e metalúrgicas para esses produtos. Adicionalmente, os fatores econômicos envolvidos nas operações de adequação dessa matéria-prima mineral serão também, indubitavelmente, avaliados na definição das rotas de processo.

Os minérios de ferro ricos, que atendem naturalmente às especificações químicas do mercado consumidor, são tipicamente processados em circuitos de fragmentação, classificação por tamanho (processo a úmido) e desaguamento. As operações de classificação a úmido e desaguamento favorecem a remoção das lamas argilosas, onde se concentram as impurezas indesejáveis, principalmente fósforo e alumina (COELHO, 1984; SILVA e VALADARES, 1988).

Para a concentração de minérios de baixos teores de ferro são utilizados, em geral, os métodos gravíticos, de concentração magnética e flotação. Segundo VIANA (2004), são inúmeras as possibilidades de combinação de processos unitários e tipos de equipamentos para o beneficiamento de minérios em diferentes sistemas minerais, o que pode levar à suposição que para um tipo específico de minério existirá uma solução única. Embora a natureza de sistemas muito diferenciados, como, por exemplo, minérios de ferro itabiríticos e minérios sulfetados de cobre, condicione a adoção de algumas práticas e tipos de circuitos característicos para cada um desses dois sistemas, a experiência industrial tem demonstrado que muitos minérios, eventualmente considerados como de um tipo único, mostram variações significativas nas suas características físicas, químicas e mineralógicas que levam a divisões do mesmo em dezenas de subtipos.

Para a seleção do fluxograma mais adequado, deve-se sempre considerar a combinação de métodos de beneficiamento que possam fornecer a flexibilidade adequada às variações nas características do minério considerado como “único”, variabilidade esta associada às diferentes espécies mineralógicas e suas propriedades intrínsecas. Outro aspecto a ser considerado ao se tratar de fluxogramas é a interdependência dos diversos processos unitários existentes no circuito industrial. A modificação nas variáveis de processo ou de projeto de um determinado processo pode gerar conseqüências importantes em outro processo localizado em outra parte do circuito, limitando ou melhorando o desempenho desse segundo processo. Assim, a condição ótima de operação de um processo específico dentro de um fluxograma deve ser vista de uma maneira integrada em

todo o fluxograma. Outra variável a ser considerada é o impacto de modificações e otimizações no fluxograma de beneficiamento de minérios nas operações subsequentes ou anteriores ao beneficiamento (VIANA, 2004).

Os minérios de baixos teores podem ser concentrados por métodos gravíticos quando a liberação dos minerais de ganga ocorre em faixas granulométricas mais grosseiras, características de produtos de circuitos de britagem e classificação. Os equipamentos mais utilizados, nesse caso, são os jigues e espirais.

Exemplo de empresa de mineração no Brasil (Vale) que utilizam métodos gravíticos no tratamento de minérios de ferro é: jigues (Unidade de Morro Agudo) e espirais (Unidade de Fábrica).

Minérios itabiríticos, que requerem moagem fina para a liberação dos minerais de ganga, são concentrados, na maioria dos casos, por separação magnética de alta intensidade a úmido e flotação catiônica reversa, sendo comuns as combinações desses processos. Exemplos clássicos de aplicação de separação magnética de alta intensidade são as usinas de Cauê e Conceição (VALE) (SANTIAGO et al, 1993).

Segundo VIANA (2004), apesar da combinação de diferentes métodos serem cada vez mais empregada, a flotação vem ampliando aceleradamente sua participação como método de concentração, devido principalmente à sua comprovada seletividade para minérios de ferro e à ampla faixa de tamanho e teores de ROM em que ela se aplica.

3.3.1. Flotação catiônica reversa de minérios de ferro

Segundo HOUOT (1983), a flotação reversa de minérios de ferro de baixos teores (itabiritos), usando amina como coletor de ganga silicatada, começou a ser utilizada nos anos 60, sendo hoje uma técnica mundialmente consolidada para

partículas minerais na faixa de 10 a 250 μ m. Anteriormente, nos anos 50, a concentração desses mesmos minérios era feita com a utilização da flotação direta dos minerais de ferro, usando sulfonato de petróleo em conjunto com óleo combustível, ácidos graxos e hidroxamatos como coletores.

O processo de flotação reversa de minério de ferro, utilizando amina como coletor/espumante e amido de milho como depressor, ocupa papel estratégico em todas as grandes usinas brasileiras produtoras de *pellet-feed*. IWASAKI (1983) destaca três fatores para esse papel primordial da flotação:

- (i.) A flotação é o principal processo utilizado para a concentração de minérios oxidados de baixos teores;
- (ii.) O processo possibilita a redução dos teores em sílica de concentrados magnéticos obtidos por separação magnética, principalmente quando a liberação extremamente fina da sílica impede o bom desempenho da separação magnética;
- (iii.) A flotação é o processo mais indicado para a produção de super-concentrados, destinados aos processos metalúrgicos de redução direta.

RABELO (1994) destaca também o forte impacto positivo da flotação nas questões ambientais, ao possibilitar a recuperação de grandes massas de frações finas de minérios de baixos teores em ferro, rejeitadas por processos destinados somente à produção de granulados e *sinter-feed*, ao longo de vários anos. A importância econômica do aproveitamento desse material também é indiscutível.

Segundo LASKOWSKI J. (1974), embora o princípio da flotação seja simples, os fenômenos que a governam são muito complexos, pois envolvem a fixação seletiva de partículas específicas à bolha de ar e o subsequente transporte do agregado partícula-bolha da polpa à espuma. No caso dos oxi-minerais, a compreensão dos aspectos mais fundamentais dos mecanismos operantes durante o processo da flotação acha-se ainda num estágio menos avançado do

que no caso dos sulfo-minerais e seus similares (BRANDÃO, 2003). BORGES (1993) ponderou que os princípios básicos de flotação podem ser divididos em duas áreas principais: química de superfície e hidrodinâmica. A química de superfície englobaria os fatores pertinentes a interações, energia, adsorção em interfaces, molhabilidade natural de minerais e uso de reagentes destinados a tornar hidrofóbicas as superfícies minerais. Por sua vez, a hidrodinâmica incluiria os fatores pertinentes a dispersão das bolhas de ar, suspensão de sólidos, colisão e adesão entre partículas minerais e bolhas de ar e estabilidade do agregado partícula-bolha. Foi também ressaltada por ele a considerável importância do tamanho das partículas em um sistema de flotação, embora não seja considerado na avaliação do desempenho do processo.

CASTRO (2002) considera a distribuição de tamanho das partículas, a serem separadas, fator determinante na performance do processo de flotação. Segundo ele, na prática industrial, as partículas entre $40\mu\text{m}$ e $10\mu\text{m}$ comportam-se como partículas ultrafinas. Já as partículas menores que $10\mu\text{m}$ têm alguns aspectos semelhantes aos colóides, como seu comportamento em meio hidráulico, alteração e influência na dispersão da polpa, interações extensas entre essas partículas e as fases aquosa e gasosa presentes no processo.

CASTRO & CRUZ (2003), estudando as diferenças de desempenho da flotação de uma amostra de minério de ferro composta ($-150\mu\text{m}$) e de uma amostra separada entre as frações ($-50\mu\text{m}$ + $+38\mu\text{m}$) e ($-38\mu\text{m}$), observaram diferentes comportamentos quando da flotação em separado, com indicações da ação deletéria de uma fração em relação à outra quando da flotação composta. Outra constatação que fizeram foi a possibilidade de estabelecimento de parâmetros ótimos para a flotação de um minério de ferro restrito a uma faixa granulométrica mais estreita (grossos e finos).

TRAHAR (1976) afirma que o tratamento separado de faixas de tamanho selecionadas se tornará necessário para os minérios mais complexos. Assim,

diferentes faixas de tamanho poderão ser condicionadas separadamente em meios mais adequados a elas. Tal procedimento redundaria em aumento na seletividade, com impactos na qualidade do produto e na recuperação do mineral útil.

Apesar de haver discordâncias entre autores e técnicos para a definição do tamanho de partículas, SOMASUNDARAN (1980) classificou as partículas, com base em seu tamanho e comportamento em meio aquoso, da seguinte forma:

- (i.) finos - partículas que não são facilmente separáveis por processos físicos de concentração e cujo tamanho médio está compreendido entre $10\mu\text{m}$ e $100\mu\text{m}$;
- (ii.) ultrafinos - partículas que não são facilmente separadas por processos convencionais de concentração, inclusive a flotação, e cujo tamanho médio está compreendido entre $1\mu\text{m}$ e $10\mu\text{m}$;
- (iii.) colóides - partículas cujo tamanho médio é inferior a $1\mu\text{m}$;
- (iv.) lamas - misturas de colóides e ultrafinos naturais e aqueles gerados em processos de cominuição. Uma característica das lamas é ter uma sedimentação bastante lenta.

SANTOS (2003) considera que, como a cominuição é a etapa do tratamento de minérios de maior custo, deseja-se cominuir no limite econômico, ou seja, somente o suficiente para promover o adequado grau de liberação das espécies minerais. Entretanto, pelos próprios mecanismos utilizados nos processos de fragmentação, há sempre uma geração indesejável de partículas abaixo do tamanho ideal, impactando os processos de concentração, uma vez que a recuperação das partículas é também função do seu tamanho. Ainda segundo ele, pelo fato dos mecanismos físico-químicos atuantes na flotação serem extremamente complexos, os problemas associados à presença de partículas finas, ultrafinas e lamas são mais pronunciados.

A figura 3.12 apresenta de forma esquemática os possíveis efeitos de partículas muito finas no processo de flotação. A análise dessa figura facilita a compreensão de alguns fenômenos que ocorrem rotineiramente.

A perda de seletividade no processo de flotação, segundo PERES, e SALUM, (2004), é decorrente principalmente do fenômeno denominado “*slimes coating*”, no qual a atuação de forças intermoleculares de longo alcance, similares às forças que determinam a interação partícula/bolha, promovem a aderência de partículas de lamas a outras partículas, mudando suas características superficiais. De acordo com APLAN & FUERSTENAU (1962), a flotação catiônica é dez vezes mais influenciada por esse fenômeno que a flotação aniônica.

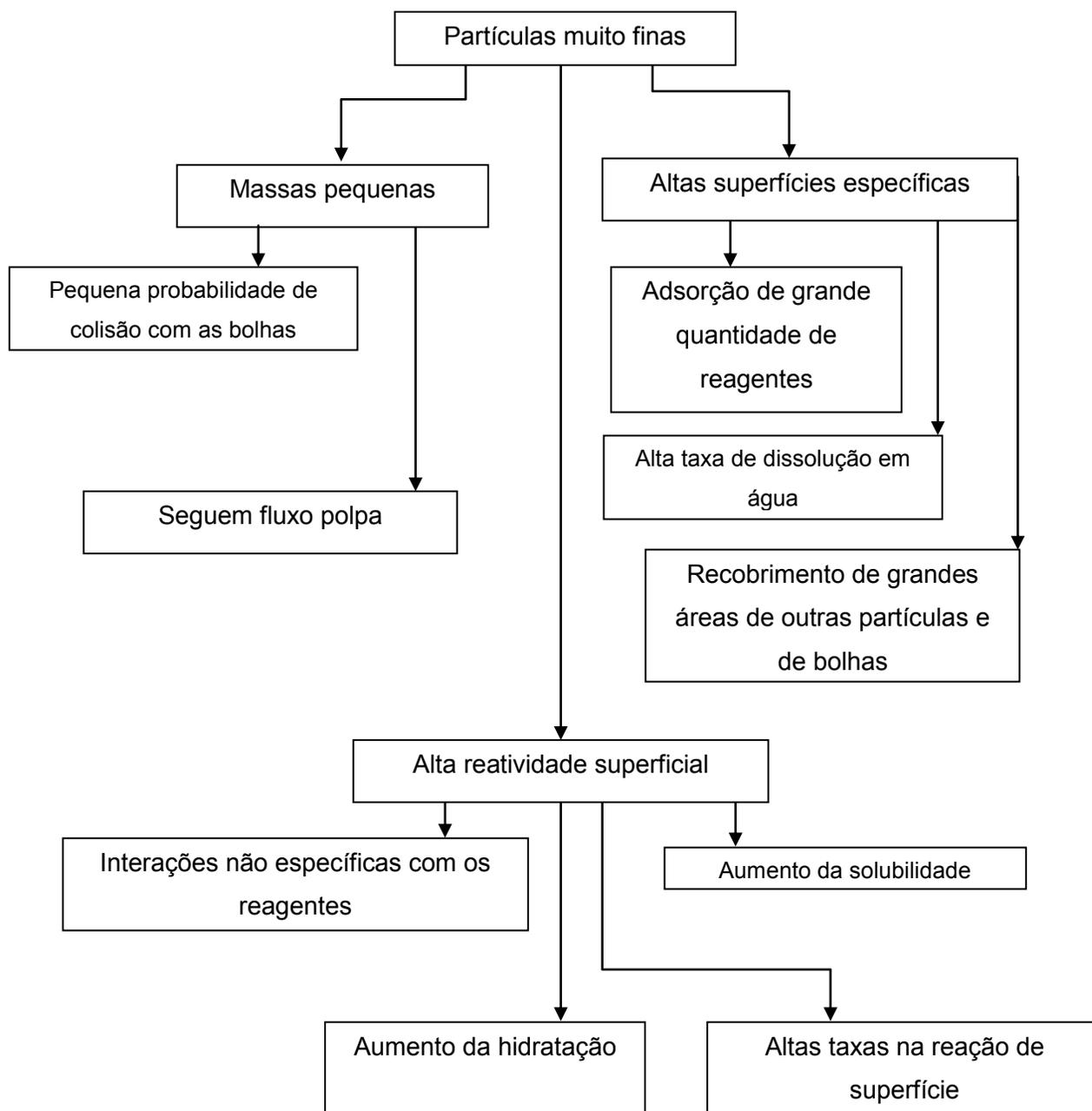


Figura 3.12 – Possíveis efeitos de partículas muito finas na flotação (KLASSEN & MOKROUSOV, 1963 apud ARAUJO, 1982).

ARAUJO (1982) desenvolveram uma investigação detalhada dos efeitos de lamas na flotação de minério de ferro e, dentre as suas conclusões, as seguintes devem ser ressaltadas com relação a flotação catiônica:

- (i.) As lamas interferem na separação tanto por *slimes coating* como através do consumo de coletor;
- (ii.) Caolinita parece ter apenas um pequeno efeito na flotação catiônica do quartzo no pH 6. O IEP da caolinita ocorre em pH 3,3;
- (iii.) A flotabilidade e a intensidade de *slimes coating* do quartzo na presença de lamas de óxidos de ferro são extremamente dependentes do tamanho e da quantidade de lamas presentes;
- (iv.) O efeito do tamanho da lama é de extrema importância no sistema quartzo-lamas de goethita, sendo mais nítido na flotação catiônica.

Segundo FUERSTENAU (1976), o aumento do consumo de reagentes deve-se à elevada área superficial das lamas, o que confere a essas partículas um alto poder de adsorção. A figura 3.13 ilustra esse aumento da área superficial.

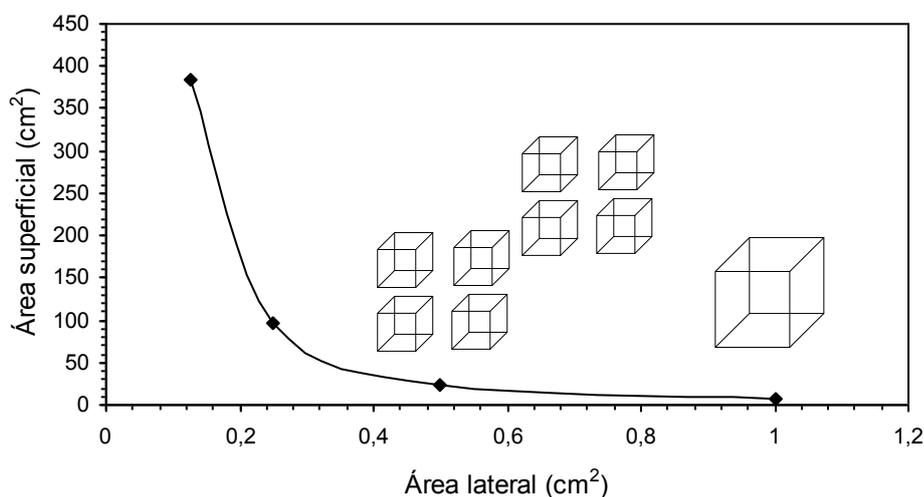


Figura 3.13 – Aumento da área superficial devido à diminuição do tamanho da partícula (TURRER, 2004).

Outra causa da influência das partículas finas no consumo de reagentes pode ser a alta energia de superfície, devido ao maior número de extremidades,

cantos e imperfeições cristalográficas, ocasionando um aumento na tendência de ocorrência de adsorção não específica do coletor, que acontece de forma a desconsiderar a natureza eletroquímica ou elétrica da dupla camada (FUERSTENAU, 1980).

SANTOS (2003) afirma que a perda de recuperação pode ocorrer devido à pequena massa das partículas de minerais de ferro que podem ser carreadas pela água contida na espuma ou arrastadas mecanicamente pelas partículas sendo flotadas. FUERSTENAU (1980), estudando os efeitos da baixa massa e momento das partículas finas em sistemas de flotação, demonstrou que as partículas finas geralmente são carreadas mecanicamente pelas lâminas de água que recobrem as bolhas de ar da espuma.

BORGES (1993), estudando o arraste na flotação catiônica reversa de minérios de ferro, comprovou que a recuperação de partículas hidrofílicas no produto flotado se deu exclusivamente na fração $-37\mu\text{m}$, tanto em testes realizados com hematita compacta quanto para testes realizados com itabirito friável, confirmando assim a presença do mecanismo de arraste nesse sistema de flotação. Concluiu também que esse arraste não é proporcional à recuperação da água no flotado, conforme defendido anteriormente por alguns autores.

Outra observação de BORGES (1993) é a diferença no comportamento da capacidade de drenagem da espuma na presença e na ausência do amido de milho. Para uma das amostras estudadas por ela, partículas hidrofílicas na faixa de tamanho de $14,62\mu\text{m}$ somente dirigiram-se ao afundado com a adição de amido de milho ao sistema. Essa mudança de comportamento foi atribuída ao fato das partículas não conseguirem drenar de volta para a polpa devido ao seu tamanho ser de valor superior à largura dos canais intersticiais entre as bolhas mineralizadas e a adição do amido diminuiu a estabilidade da espuma formada, aumentando a largura dos canais intersticiais e proporcionando uma maior drenagem para as partículas.

3.3.2. Deslamagem de minérios de ferro

Grande parte dos depósitos brasileiros de minérios de ferro contém porções altamente decompostas por ação do intemperismo, o que conduz a participações significativas de partículas minerais finas. Além dos finos naturais, presente em grandes quantidades nos itabiritos friáveis, ocorre à geração de partículas finas durante as operações de lavra e processos de cominuição (FERREIRA, 2004).

Taggart (1945) afirma que as lamas podem causar os seguintes efeitos na flotação: aumento no consumo de reagentes, perda de seletividade e de recuperação. Na tentativa de neutralizar esses efeitos, o processo de flotação catiônica reversa de minérios de ferro requer sempre a utilização anterior de uma deslamagem.

Conforme SIVAMOHAN (1990), concluiu que as propriedades físicas e químicas de partículas finas e seu comportamento durante o processo de flotação, ocasionam, dentre outros, os seguintes problemas:

- (i.) Baixa probabilidade de colisão das partículas e adesão;
- (ii.) Alto consumo de reagentes, devido à alta área superficial;
- (iii.) Cobertura de outras partículas por lama (*slimes coating*);
- (iv.) Carreamento dessas partículas pelo fluxo de polpa.

SOUZA & ARAUJO (1999), estudando a influência do tamanho das partículas de lama na flotação de minérios de ferro, verificaram que tamanhos de partículas diferentes levam a diferentes valores para as constantes cinéticas de flotação. As tabelas 3.19 e 3.20 apresentam resultados de testes de flotação em bancada para uma alimentação constituída de quartzo (-100 μ m +75 μ m), hematita (-75 μ m +38 μ m) e lama hematítica (-9 μ m). Na tabela 3.20 observam-se perdas de seletividade do processo e redução da recuperação mássica de quartzo, ocasionadas pela presença de lama na flotação e a tabela 3.21

evidencia que a faixa granulométrica do segundo mineral presente no sistema de flotação é de grande importância no desempenho da flotação.

Tabela 3.20 – Perdas de seletividade do processo de flotação devido à presença de lamas (SOUZA & ARAUJO, 1999).

Teste	Recuperação em Peso (%)	% SiO ₂ no Concentrado	Recuperação Massa de Quartzo no Flotado (%)
Sem lama hematítica	91,5	3,34	55,0
Com lama hematítica	90,4	8,41	5,0

Tabela 3.21 – Desempenho da flotação de quartzo na presença de espécies minerais de diferentes faixas granulométricas (SOUZA & ARAUJO, 1999).

Teste	% Quartzo flotado em relação à massa inicial
100% Quartzo	80,0
85% Quartzo + 15% Hematita	76,0
85% Quartzo + 15% Lama Hematítica	60,0

FERREIRA (2002) exemplifica a queda no rendimento do processo de concentração do minério de ferro da mina de Alegria, em presença de lamas, com resultados de testes de flotação em escala de laboratório, apresentados no gráfico da figura 3.22. Nessa série de testes, o padrão de comparação foi estabelecido com a alimentação da flotação submetida a sucessivas etapas de deslamagem por sedimentação em laboratório, até se obter um produto *overflow* clarificado; além disso, adicionaram-se quantidades medidas de lama nos testes subsequentes. As dosagens de reagentes e demais condições operacionais de realização dos testes foram mantidas constantes.

A sensibilidade dos índices de recuperações metálicas (representados pelos teores em ferro nos rejeitos) na flotação, em relação à presença de lama, é extremamente nítida; observa-se grande efeito, a partir da adição de apenas 2% (em massa) de lama. O efeito da presença de lamas no teor em sílica do concentrado é menos pronunciado, mas também significativo.

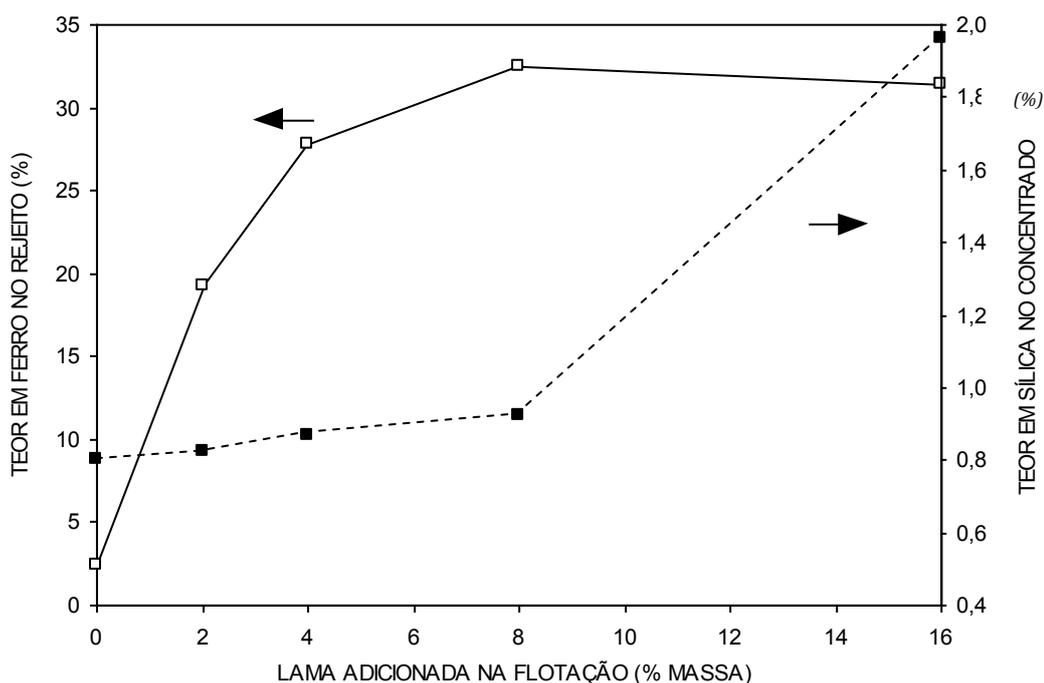


Figura 3.22 - Efeito das lamas na flotação catiônica reversa de minério de ferro da mina de Alegria (RABELO, 1994).

ARAUJO (1982), estudando a influência do efeito de “*slimes coating*” na flotabilidade de partículas de quartzo e hematita, observou que a composição mineralógica das lamas também influencia a flotação. Lamas constituídas exclusivamente por caolinitas afetam em muito menor grau a flotabilidade do quartzo com eteraminas que lamas naturais de minérios de ferro, constituídas por uma mistura de diversos minerais, tais como: goethita, hematita, caolinita e gibbsita.

SANTOS & BRANDÃO (2003), realizando a caracterização mineralógica de amostras provenientes da mina de Alegria, observaram que a hematita martítica apresenta porosidade variada e pode conter goethita terrosa em seus poros. Esse material é de difícil remoção devido ao pequeno tamanho dos poros. Nas amostras estudadas, a goethita terrosa apresentou variações quanto a sua forma de ocorrência (intergranular e intragranular) e mostrou teores de Al_2O_3 e SiO_2 variáveis. Esse material terroso e friável produz uma grande quantidade de finos durante as etapas do processamento mineral.

Com isso, concluíram que sua presença constante e seus valores relativamente altos podem influenciar na composição química dos concentrados finais correspondentes.

LIMA (2001) estudou a influência do percentual de lama na flotação de minérios de ferro e observou que a quantidade de lama afeta de modo diferente a seletividade de cada amostra testada. Em algumas amostras, um maior percentual de lama afetou somente o teor de fósforo no concentrado. Devido a esses fatos, concluiu que o comportamento na flotação está associado às características químicas, granulométricas e mineralógicas das respectivas lamas.

Todos esses fatos evidenciam a necessidade da deslamagem dos minérios de ferro no intuito de obter-se uma performance otimizada na etapa de flotação. Por outro lado, a deslamagem é uma etapa na qual podem ocorrer perdas superiores a 20% do conteúdo metálico dos minérios, junto às frações finas removidas. O pH básico, favorece a dispersão dos sólidos na polpa e por consequência favorece a etapa de deslamagem.

RABELO (1994) afirma que a extrapolação dos conceitos inerentes a sistemas coloidais, até suspensões de partículas finas, é frequente em estudos de agregação e dispersão de sistemas minerais. A dispersão ou a agregação de partículas finas suspensas em um meio aquoso é determinada pela interação

entre as partículas, quando estas colidem umas com as outras. As forças repulsivas são atribuídas ao efeito de superposição das duplas camadas elétricas das partículas (atração/repulsão devido à interação eletrostática).

Segundo a teoria de Derjaguin-Landau e Verwey-Overbeek (DLVO), o grau de estabilidade de um sistema funcionará de acordo com o somatório de forças atrativas de van der Waals e das forças repulsivas atribuídas ao efeito da superposição das duplas camadas elétricas das partículas. Assim, quando a componente correspondente às forças de van der Waals for maior que a componente de repulsão entre as partículas, ocorrerá agregação, e o sistema se tornará termodinamicamente instável. Contrariamente, quando a repulsão eletrostática prevalecer sobre as forças de van der Waals, haverá dispersão e, em consequência, o sistema permanecerá termodinamicamente estável (PERES, COELHO e ARAUJO, 1980).

SILVA (1994) afirma que os fenômenos de agregação e dispersão, baseados na teoria DLVO, são atribuídos a fatores que influenciam as características elétricas das partículas de uma polpa. Alguns desses fatores são: adição de eletrólito indiferente, mudanças na concentração dos íons determinadores de potencial (IDP) da polpa, variação da força iônica da solução, etc.

Na figura 3.23, pode-se observar o efeito do pH de dispersão na deslamagem e, conseqüentemente, na flotação. Para um mesmo minério, foram efetuadas deslamagens com o pH de dispersão nos níveis de 8,5, 9,0 e 9,5. O material proveniente das três deslamagens foi flotado separadamente nas mesmas condições (dosagens de coletor e depressor, tempos de condicionamento e de coleta, pH de flotação).

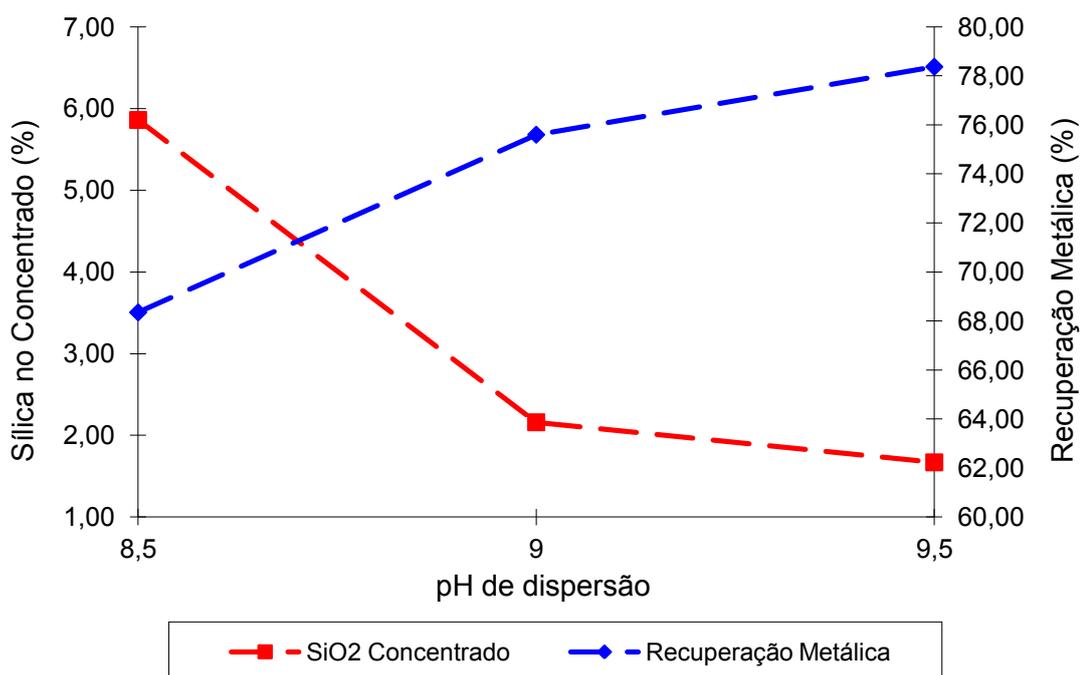


Figura 3.23 – Teor de SiO₂ no concentrado e recuperação metálica na flotação em função pH de dispersão na deslamagem (SILVA (1994)).

Na tabela 3.22 observamos os diferentes teores de alimentação da flotação para os três níveis de pH de dispersão utilizados na deslamagem.

Tabela 3.22 – Teores da alimentação da flotação em função do pH de dispersão na deslamagem (SILVA (1994)).

pH dispersão	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	P (%)	PPC (%)
8,5	44,84	33,52	0,59	0,026	1,69
9,0	43,98	35,05	0,42	0,024	1,56
9,5	43,88	35,44	0,34	0,025	1,40

Esses resultados corroboram as observações de SOUZA Jr. (1994), ou seja, que quanto menor a recuperação metálica na deslamagem, isto é, quanto maior a perda de minerais de ferro e argilominerais ultrafinos na deslamagem, maiores os valores de recuperação metálica na flotação e que menores

percentuais de lama também implicam em um menor teor de sílica no concentrado.

Outra possibilidade de otimização da deslamagem é uma etapa de atrição anterior à etapa de deslamagem. QUEIROZ (2003) observou em seus estudos que é possível obter-se uma diminuição dos teores de ferro no rejeito à medida que há o aumento do tempo de atrição da polpa, tanto para a condição de maior quanto de menor estabilidade termodinâmica da polpa. Outro efeito observado por ele foi que a remoção parcial e/ou total de massas terrosas que recobrem a superfície do quartzo melhora a ação do coletor e aumenta a sua capacidade de flotar quartzo menor que 45 μ m.

3.3.3. Flotação direta de minérios de ferro

A primeira patente para beneficiamento de minério composto de hematita e quartzo usando o processo de flotação foi emitido por Tullis em 1923. Os ácidos graxos, em especial o ácido oléico, foram usados para flotar a hematita separando-a do quartzo. O silicato de sódio foi utilizado como depressor da ganga, utilizando dosagem de 112 g/t, ácido oléico de 900 g/t. Um concentrado com teor superior a 60 (%) Fe foi conseguido a partir de um teor de alimentação de 35,5 (%) de Fe e 87,5 (%) de recuperação do Fe em um minério de ferro chinês. No ano seguinte, Sulman Edser separou hematita de feldspato e quartzo, usando oleato ou estearato (citado por SUTHERLAND E WARK, 1955).

Segundo GAUDIN (1932) a melhor seletividade na flotação de hematita do quartzo ocorreu em uma faixa de pH de 3,5 a 4,0. Este ensaio envolveu a separação de uma mistura de hematita especular e quartzo usando 90 g/t de óleo de pinho e 450 g/t de oleato de sódio. A recuperação da hematita ficou perto de 90 % e a recuperação do quartzo ficou próxima dos 10 % para esta faixa de pH. O tamanho das partículas minerais foi entre 150-25 μ m.

Muitas investigações laboratoriais sobre a flotação de hematitas utilizando oleato a partir de minérios de ferro têm sido realizadas, alguns das quais são resumidas na tabela 3.23.

Yang (1979) desenvolveu um processo para a flotação de minérios de ferro não magnéticos utilizando ácidos graxos, que depende do desenvolvimento de um estado controlado de dispersão do óxido de ferro e minerais de ganga. O ensaio foi realizado em minérios de ferro moídos a 85 % passando 25 µm para liberar os minerais de ferro. No condicionador foi utilizado uma mistura de silicato de sódio, nitrato de ferro e ácido sulfúrico na proporção 5:1:1. O pH foi ajustado para 8,8 e 450-675 g/t de um coletor ácido foi adicionado. Realizou-se o ensaio de flotação e o flotado (*rougher*) foi limpo várias vezes. O concentrado típico ficou com um teor de 65 % de Fe e a recuperação foi de 88 %. Estes resultados foram confirmados nos testes em escala piloto.

Tabela 3.23: Flotação de minérios de ferro usando ácido oléico ou oleato de sódio e oleato de potássio como coletores QUAST, (1999).

Material	Coletor	pH ótimo	(% Fe) Alimentação	(% Fe) Concentrado	Recuperação (%)	Referência
Minério	Ácido oleico	-	17	59	74	Adams,Kobey e Sayers (1931)
Rejeitos	Ácido oleico	-	24	63	93	Searles (1938)
Rejeitos	Oleato de sódio	>8	35	59	92	Cooke e Talbot (1955)
Minério	Ácido oleico	6 - 7	20	65	90	Cooke,Iwasaki e Choi (1959)
Minério	Ácido oleico	-	36	62	78	Cooke e Nummela (1959)
Minério	Ácido oleico	6 - 7	20	62	60	Cooke,Iwasaki e Choi (1960)
Minério	Ácido oleico	7	-	66	88	Thurston ,Kudo e Cooke (1962)
Rejeitos	Ácido oleico	-	49	66	87	Sorensen,Colombo e Frommer (1964)
Hematita	Ácido oleico	7,5	35	63	90	Balint e Fleming (1965)
Minério	Oleato de potássio	8,5	42	59	82	Fuerstenau,Harper e Miller (1970)
Minério	Oleato de sódio	7	38	60	70	Tripathi,Dey e Jena (1976)
Minério	Oleato de potássio	7,8	40	64	56	Kulkarni (1976)
Minério	Ácido oleico	8	40	65	60	Kulkarni e Somasundaran (1977)
Rejeitos	Ácido oleico	6,5 - 7	16	51	83	Meech (1981)
Minério	Ácido oleico	6,5	16	53	84	Pindred e Meech (1984)
Minério	Ácido oleico	5,5	41	67	99	Tovar, Navarro e Pastrana (1988)
Rejeitos	Ácido oleico	-	32	45	50	Klimpel e Fee (1993)
Minério	Oleato de sódio	7	32	67	91	Vieira e Salum (1994)
Mistura	Oleato de sódio	6	15	41	94	Pascoe e Doherty (1997)

A flotação aniônica direta é, geralmente, utilizada para minérios que possuem baixo teor ou para rejeitos, que foram descartados em barragens de rejeitos. Os coletores usados são os ácidos graxos e os depressores ainda estão sendo estudados (Araújo, et al, 2004).

LIU (1996) estudou a flotação direta de minério de ferro, através de ensaios realizados em células de Fuerstenau e ensaios de flotação em escala de bancada. Utilizou como coletores o sulfonato de petróleo, o óleo de arroz e o óleo de rícino, saponificados em meio aquoso e alcoólico. Como depressores, foram utilizados o silicato e hexametáfosfato de sódio e o ácido tânico (tanino). O sulfonato de petróleo apresentou resultados promissores para a faixa de pH entre 6 e 8. O óleo de arroz, saponificado em meio alcoólico apresentou melhores resultados em relação ao reagente saponificado em meio aquoso. O óleo de arroz teve melhor desempenho em comparação ao óleo de rícino saponificado em meio aquoso. No entanto, o óleo de rícino saponificado em meio alcoólico apresentou alta flotabilidade para a hematita e baixa flotabilidade para a sílica, a uma concentração de 400 g/t deste reagente, indicando uma boa seletividade entre os minerais. O silicato de sódio mostrou ser pouco eficaz na depressão do quartzo. O hexametáfosfato de sódio demonstrou ser um depressor “energético” tanto para o quartzo quanto para a hematita. E o ácido tânico (tanino) mostrou ser mais seletivo, apresentando concentrados mais puros apesar de deprimir um pouco a hematita, reduzindo sua recuperação no concentrado.

QUAST (1999), em estudos realizados com amostras do mineral hematita apresentaram flutuação predominantemente na região de pH neutro utilizando baixa dosagem de oleato de sódio.

LOPES (2009), Realizou ensaios de flotação direta da hematita em escala de bancada com a amostra de minério “Serra da Serpentina” efetuados no valor de pH 7,0 e obteve recuperação metalúrgica de Fe de 90,0 % e teores de Fe e SiO₂ no concentrado de 58,2 e 14,2 % respectivamente, utilizando como reagente coletor da hematita oleato de sódio e como depressor do quartzo o silicato de sódio. Esses valores foram muito piores que aqueles obtidos com o mesmo minério na flotação reversa utilizando amina e amido em pH 10,5 (recuperação metalúrgica do Fe de 75,8 % e teores de Fe e SiO₂ no concentrado de 66,4 e 3,8 %, respectivamente).

4. METODOLOGIA

4.1. Composição e preparação das amostras

A amostra é proveniente do Quadrilátero Ferrífero apresentando teor aproximado de 42,0 % de ferro global. A amostra passou pelo processo de preparação descrito no fluxograma (Figura 4.1). Após a preparação as amostras passaram por um processo de secagem em estufa com temperatura a 105°C e a fração - 0,15 mm natural alvo deste estudo, foi desagregada. A homogeneização da mesma foi feita através de pilhas cônicas e a redução da massa para os ensaios de flotação foi feita utilizando-se o divisor de rifles.

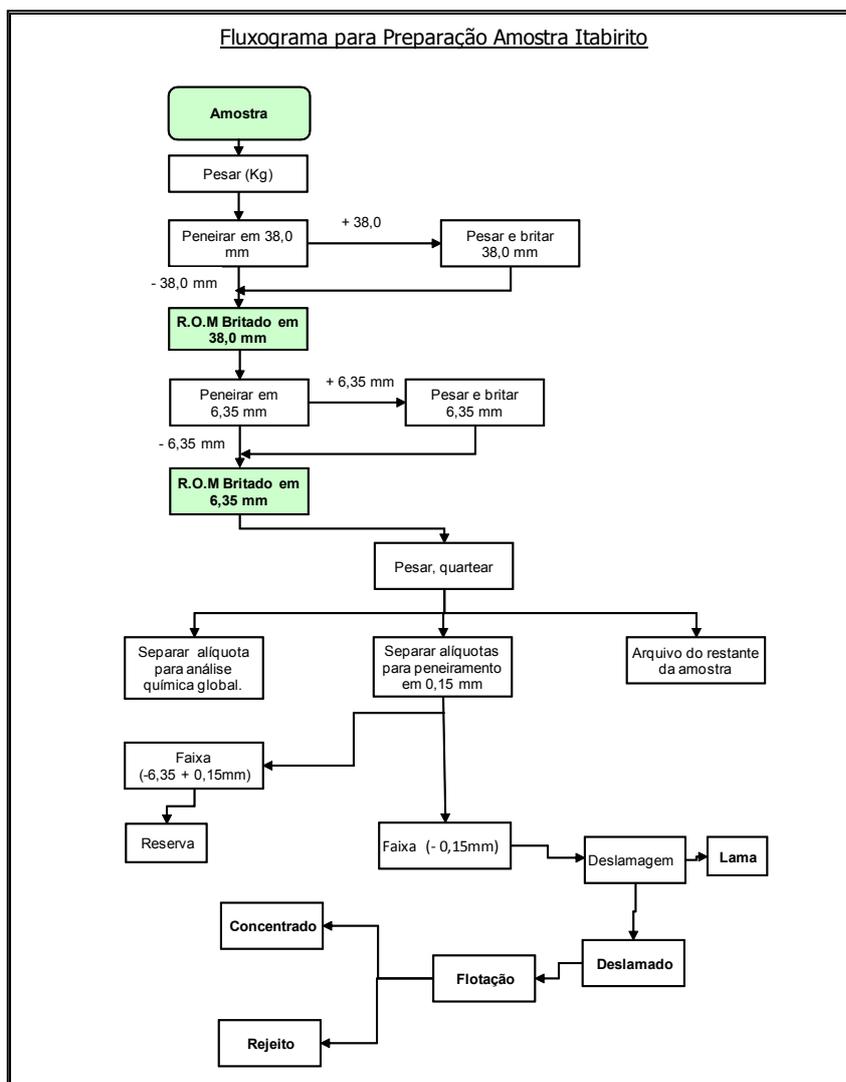


Figura 4.1 – Fluxograma de preparação da amostra.

4.2. Caracterização da amostra

A caracterização da amostra foi realizada conforme o fluxograma mostrado na figura 4.2 e os procedimentos gerais adotados são descritos nos itens a seguir.

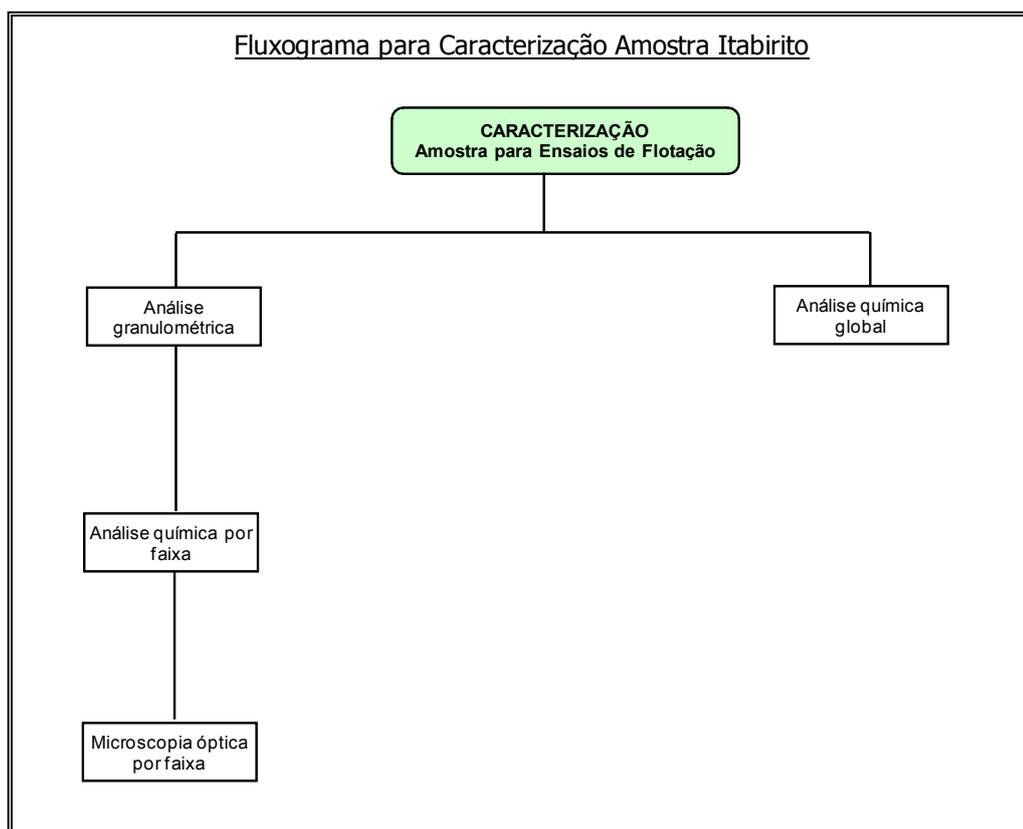


Figura 4.2 - Fluxograma de caracterização para a amostra de itabirito utilizada nos ensaios de flotação em laboratório.

4.2.1. Análise granulométrica

A análise granulométrica da amostra foi realizada utilizando-se as peneiras com aberturas de 149 μ m, 105 μ m, 74 μ m, 63 μ m, 53 μ m, 44 μ m e 37 μ m da marca Granutest, com 200 mm de diâmetro e 50 mm de altura.

4.2.2. Análise química

As análises químicas foram realizadas via úmida para o elemento ferro (dicromatometria). Os teores de sílica, alumina e fósforo foram determinados por um espectrômetro de absorção atômica com plasma acoplado indutivamente, da marca Spectro. O teor de PPC foi determinado por calcinação em forno mufla, a 1000°C.

4.2.3. Microscopia ótica de luz refletida por faixa de tamanho

Cada fração granulométrica foi analisada em um microscópio da marca Leica, modelo DMLP, com máquina fotográfica acoplada e aumento de até 500 vezes. As seções polidas foram confeccionadas utilizando-se o embutimento dos minerais em resina de cura rápida, a frio. Após a cura as seções foram lixadas com lixa d'água e polidas com pasta de alumina e pasta de diamante. Foi utilizado o método de contagem de grãos (mínimo de 500 grãos), possibilitando identificar os percentuais volumétricos relativos de quartzo e minerais de ferro presentes. Através do peso específico de cada mineral, foi determinada a proporção em peso de cada fase mineralógica presente.

Foi determinado também o grau de liberação do mineral quartzo em todas as frações granulométricas analisadas. O método utilizado foi o método de Gaudin.

4.2.4. Testes tecnológicos

4.2.4.1 Testes de flotação em célula mecânica de laboratório

Os testes de flotação em bancada foram realizados em célula fabricada pela Engendrar modelo CFB – 1000N com a utilização da cuba de 1200 cm³, de volume total o que corresponde a **850 cm³**, com rotação de 900 rpm. Foram testados os seguintes coletores para a hematita:

- Ácido oléico;

- OGVI - Óleo graxo vegetal Industrial;
- Flotin FS-1 (Produto em desenvolvimento na indústria química);
- Flotin FS-2 (Produto em desenvolvimento na indústria química);
- Óleo de pinho (usado como coletor neste trabalho após saponificação).

O silicato de sódio foi o depressor utilizado para os minerais de ganga.

Com o intuito de avaliar a seletividade deste processo, foram realizados inicialmente ensaios com a variação do pH em faixa ampla (pH 3,5 a pH 10,0) com 5 (cinco) reagentes coletores, mantendo fixa a porcentagem de sólidos do condicionamento e flotação e tempo de coleta dos produtos. Após avaliação desta etapa, foram avaliados: velocidade de rotação, tempo de condicionamento; dosagem do reagente depressor para os minerais de ganga, dosagem do reagente dispersante e dosagem do reagente espumante.

Para minimizar o número de testes de flotação em bancada, reduzir tempo e custos de laboratório, e validar numericamente os resultados, foram realizados neste projeto experimentos conforme pré-planejamento. A fim de maximizar a robustez do experimento, os testes foram feitos em ordem aleatória. As variáveis respostas foram: índice de seletividade GAUDIN modificado, teor de sílica no concentrado, teor de ferro no rejeito, recuperação mássica e recuperação metalúrgica.

4.2.5. Testes Experimentais de Deslamagem e Flotação

4.2.5.1. Testes em Escala de Bancada

A primeira fase dos testes experimentais de deslamagem e flotação foi realizada em escala de bancada, sob condições controladas, no Laboratório.

Esta fase foi planejada e realizada com o objetivo de se verificar o comportamento da amostra a ser estudada no processo de concentração por

flotação direta. A verificação da concentrabilidade desta amostra por flotação catiônica reversa em escala de bancada forneceu indicativos importantes para a continuidade deste estudo que poderá vir a ter aplicação industrial.

Uma amostra de minério itabirítico de baixo teor foi coletada e encaminhada para o laboratório, onde foi submetida a um processo conforme fluxograma apresentado na figura 4.2, sendo que a mesma foi deslamada em duas etapas, seguindo o procedimento de teste padrão descrito a seguir.

A amostra foi acondicionada em um balde de 17 L, sob agitação manual. O pH da polpa foi ajustado em 10,5 com utilização de NaOH. Cessada a agitação, o material foi deixado em repouso para decantação por 5 minutos e, após este tempo, o sobrenadante foi sifonado e coletado em um outro recipiente. Adicionou-se água no material residual do balde para ajuste da porcentagem de sólidos em 10%. Novamente o material foi agitado manualmente, deixado decantar por 5 minutos, tempo após o qual o sobrenadante foi sifonado. Este segundo sobrenadante foi incorporado ao primeiro.

O sobrenadante (*overflow*) foi filtrado em filtro de pressão, secado em estufa a 105°C e pesado. Uma alíquota desse material foi retirada e enviada para análise química por fluorescência de raios-X.

O material afundado (*underflow*) foi filtrado em filtro de pressão, secado naturalmente e pesado. Uma alíquota foi retirada para análise química por fluorescência de raios-X. Esta amostra foi validada e a fração – 0,15 mm deslamada foi submetida ao processo de caracterização conforme a figura 4.2. Foi tomado o cuidado de não secar o *underflow* em estufas ou chapas quentes, evitando assim, possibilidades de alteração em suas características superficiais. O *underflow* foi submetido ao processo de homogeneização em pilhas cônicas e separado em alíquotas de 250 g utilizando divisor de rifles.

A alíquota *underflow* foi colocada na cuba de flotação da célula de bancada (fabricada pela Engendrar, modelo CFB-1000N) mantendo a agitação do rotor a 900 rpm. Foi adicionada água nova para ajuste da porcentagem de sólidos em 50 % em peso.

Nesse momento iniciou-se o condicionamento do coletor por 3 minutos (de acordo com a condição estipulada para cada teste). Durante este tempo o pH da polpa foi ajustado para o pH necessário de acordo com a condição estipulada para cada teste, com ácido sulfúrico (H_2SO_4) ou soda cáustica (NaOH). A polpa foi diluída para 35 % de sólidos (peso/peso) com água cujo pH ajustado de acordo com a condição estipulada para cada teste. Após esse tempo, abriu-se a aeração da célula e iniciou-se a coleta da espuma com duas espátulas padronizadas por 6 minutos. Durante a coleta, o nível de polpa da cuba foi completado com água com pH ajustado de acordo com a condição estipulada para cada teste. Após os 6 minutos de coleta de espuma a aeração foi interrompida e encerrou-se o teste.

A espuma foi filtrada em filtro de pressão, secada em estufa a 105°C, pesada e retirada alíquota para análise química por fluorescência de raios-X. O mesmo procedimento foi realizado para o afundado.

A figura 4.3 apresenta a célula de flotação utilizada nos testes de flotação e a figura 4.4 nos mostra o conjunto de cubas que podem ser utilizadas nessa célula. Para este trabalho foi utilizada a cuba de menor volume útil (700cm³) para melhor aproveitamento da amostra (possibilidade de execução de maior número de testes). A cuba utilizada nos testes está destacada na figura 4.4.

O volume útil da cuba é calculado deixando-se 1 (um) cm de altura para formação de espuma, com o rotor mergulhado e em funcionamento (900 rpm). O volume total da cuba utilizada é de 850 cm³.



Figura 4.3 - Célula de flotação utilizada nos testes em escala de bancada.



Figura 4.4 – Conjunto de cubas que podem ser utilizadas na célula de flotação modelo CFB 1000N de fabricação da Engendrar com destaque para a cuba de 700 cm³ de volume útil.

Após a obtenção dos resultados, os dados foram tabelados em planilhas eletrônicas e fechados os balanços de massas e materiais.

Foram testados as seguintes reagentes:

1. Função de coletor:
 - 1.1. Ácido oléico;
 - 1.2. OGVI - Óleo graxo vegetal industrial;
 - 1.3. Flotin FS-1;
 - 1.4. Flotin FS-2;
 - 1.5. Óleo de pinho.

2. Função de depressor:
 - 2.1. Silicato de sódio.

3. Função de espumante:
 - 3.1. Flotanol D 25.

4. Função de dispersante:
 - 4.1. Hexametáfosfato de sódio.

5. Foram avaliada as seguintes variáveis:
 - 5.1. Condições de pH;
 - 5.2. Dosagem dos reagentes;
 - 5.3. % de sólidos no condicionamento;
 - 5.4. Velocidade de agitação;
 - 5.5. Tempo de condicionamento.

Como variáveis respostas para cada teste, foram avaliados o índice de seletividade de GAUDIN modificado, a % de sílica no concentrado, o teor de ferro no rejeito as recuperações mássica e metalúrgica como sendo as mais relevantes.

Outros parâmetros importantes dos testes em bancada:

- Concentração dos reagentes coletores, depressor, espumante e dispersante: 1% (peso/peso);
- Concentração da soda (NaOH): 1 % (peso/peso);
- Concentração do ácido sulfúrico (H₂SO₄): 1 % (peso/peso).
- Relação coletor/soda: 4:1.

Os reagentes coletores, foram emulsificados com soda cáustica numa relação coletor/soda: 4:1, considerado adequado para os testes.

Os resultados da fase de bancada com a amostra estudada foram positivos o suficiente para sustentar a fase piloto ou até mesmo um teste industrial, embora otimizações podem ainda ser feitas.

Parâmetros de Avaliação dos Testes de Flotação

Os critérios de avaliação de desempenho dos testes experimentais (escala de bancada) foram os seguintes:

$$\text{Recuperação Mássica: } R = \frac{C}{A} \times 100 \text{ ;}$$

$$\text{Recuperação Metalúrgica: } R_m = \frac{C_c}{A_a} \times 100 \text{ ;}$$

onde:

C = massa do concentrado;

A = massa da alimentação;

c = teor de ferro no concentrado;

a = teor de ferro na alimentação.

Índice de Seletividade GAUDIN modificado:

$$IS = \sqrt{\frac{\% \text{ Fe concentrado} \times \% \text{ SiO}_2 \text{ rejeito}}{\% \text{ Fe no rejeito} \times \% \text{ SiO}_2 \text{ concentrado}}} \text{ ;}$$

- Teor de sílica no concentrado: (% SiO₂);
- Teor de ferro no rejeito: (% Fe).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Massa específica

Os resultados de determinação da massa específica da amostra usada para os testes de flotação são apresentados na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Resultados da determinação da massa específica do material.

Teste	Massa Específica (g/cm ³)
1	3,211
2	3,224
3	3,217
Média	3,217
Desvio Padrão	0,006

A massa específica média foi de 3,217 g/cm³, concordando o teor médio de ferro da amostra usada nos testes de flotação que foi de 25,78 %.

5.2. Análises químicas e granulométricas

Os resultados das análises químicas global e por faixa da amostra usada nos testes de flotação estão apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resultados das análises químicas (global e por faixa).

Malha (µm)	Análise Granulométrica		Análise Química (%)					
	Retida (%)	Acumulada (%)	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	P	PPC
150	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-
106	26,02	26,02	35,91	46,50	0,21	0,85	0,020	1,32
75	38,72	64,74	21,28	67,41	0,20	0,49	0,004	1,15
63	2,70	67,44	20,92	68,34	0,16	0,43	0,003	0,98
53	21,00	88,44	19,29	70,55	0,20	0,49	0,011	0,72
37	5,16	93,60	22,84	63,69	0,25	0,51	0,013	2,00
-37	6,40	100,00	39,60	38,40	0,83	1,43	0,020	2,57
		Calculada	25,91	60,61	0,24	0,64	0,011	1,23
		Analisada	25,78	60,33	0,26	0,68	0,010	1,28

A amostra usada nos testes de flotação é composta essencialmente de hematita, quartzo e goethita apresentando os seguintes teores dos elementos químicos: 25,78 % ferro, 60,33 % de sílica, 0,26 % de alumina 0,68 % de

manganês, 0, 010 % de fósforo e 1,28 % de perda por calcinação. Os teores apresentam pouca variação nas faixas estudadas.

5.3. Análise mineralógica e grau de liberação

Os resultados das análises mineralógicas global e por faixa e o grau de liberação, da amostra usada nos testes de flotação estão apresentados na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Resultados das análises mineralógicas (global e por faixa) e grau de liberação.

Malha (µm)	Análise Granulométrica		Análise Mineralógica (%)												GL
	Retida (%)	Acumulada (%)	HE	HL	HG	HM	MA	GO	GT	QL	QM	MN	MI	OT	
150	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
106	26,02	26,02	10,57	2,93	0,00	21,28	3,45	9,99	0,65	49,55	0,93	0,66	0,00	0,00	98,17
75	38,72	64,74	6,58	5,39	1,80	12,25	1,14	7,86	0,45	64,02	0,13	0,38	0,00	0,00	99,80
63	2,70	67,44	14,77	4,83	0,00	6,55	0,84	5,15	0,39	66,36	0,27	0,70	0,14	0,00	99,60
53	21,00	88,44	14,66	2,79	0,00	3,00	1,21	6,38	0,00	70,30	0,13	0,95	0,00	0,58	99,81
37	5,16	93,60	22,97	2,19	2,35	2,00	0,29	8,80	0,00	60,65	0,11	0,65	0,00	0,00	99,81
-37	6,40	100,00	36,51	0,00	4,69	3,71	0,32	15,59	0,00	36,88	0,42	1,30	0,00	0,59	98,88
		Calculada	12,29	3,68	1,12	11,43	1,65	8,58	0,35	59,72	0,36	0,65	0,00	0,16	99,31
HE = Hematita especular HL = Hematita lamelar HG = Hematita granular HM = Hematita martítica			MA = Magnetita GO = Goethita GT = Goethita terrosa QL = Quartzo livre			QM = Quartzo misto MN = Óxido de manganês MI = Mica OT = Outros Minerais			GL = Grau de Lib. do QZ						

A amostra usada nos testes de flotação é composta essencialmente de hematitas e quartzo livre, apresentando os seguintes percentuais dos minerais: 28,52 % hematitas, 1,65 % magnetita, 8,93 % goethitas, 59,72 % quartzo livre, 0,65 % manganês. Esta amostra está com um excelente grau de liberação em todas as faixas estudadas e um grau de liberação global de 99,31 %.

5.4. Resultados dos testes experimentais de flotação

5.4.1. Resultados dos testes em escala de bancada utilizando o ácido oléico

A tabela 5.4 apresenta os resultados dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

Tabela 5.4 – Resultados dos testes de flotação, utilizando como coletor ácido oléico para avaliação da influência do pH.

Código do Ensaio	Recuperações		IS	Teor		pH	Reagente	
	Mássica	Metalúrgica	Gaudin	SiO ₂ - Conc.	Fe - Rej.		Coletor	Depressor
	(%)	(%)	Adm.	(%)	(%)	Adm.		
F - 01	44,08	93,54	10,22	16,68	2,97	pH 3,5	Ácido Oléico	Nenhum
F - 02	43,96	93,81	10,78	15,97	2,85	pH 5,0		
F - 03	43,00	92,61	10,01	15,62	3,35	pH 6,0		
F - 04	42,21	92,66	11,43	12,49	3,32	pH 7,0		
F - 05	44,13	93,84	10,37	16,99	2,85	pH 8,0		
F - 06	95,54	98,22	1,87	59,96	10,26	pH 10,0		

Nos testes de flotação realizados para avaliar a influência do pH utilizando como coletor o ácido oléico, pode ser observado na tabela 5.4 que o pH 7,0 foi o que obteve maior índice de seletividade GAUDIN (11,43), com um teor de sílica no concentrado de 12,49 %, um teor de ferro no rejeito de 3,32 %, uma recuperação mássica de 42,21 % e uma recuperação metalúrgica de 92,66%.

A figura 5.4 apresenta os resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

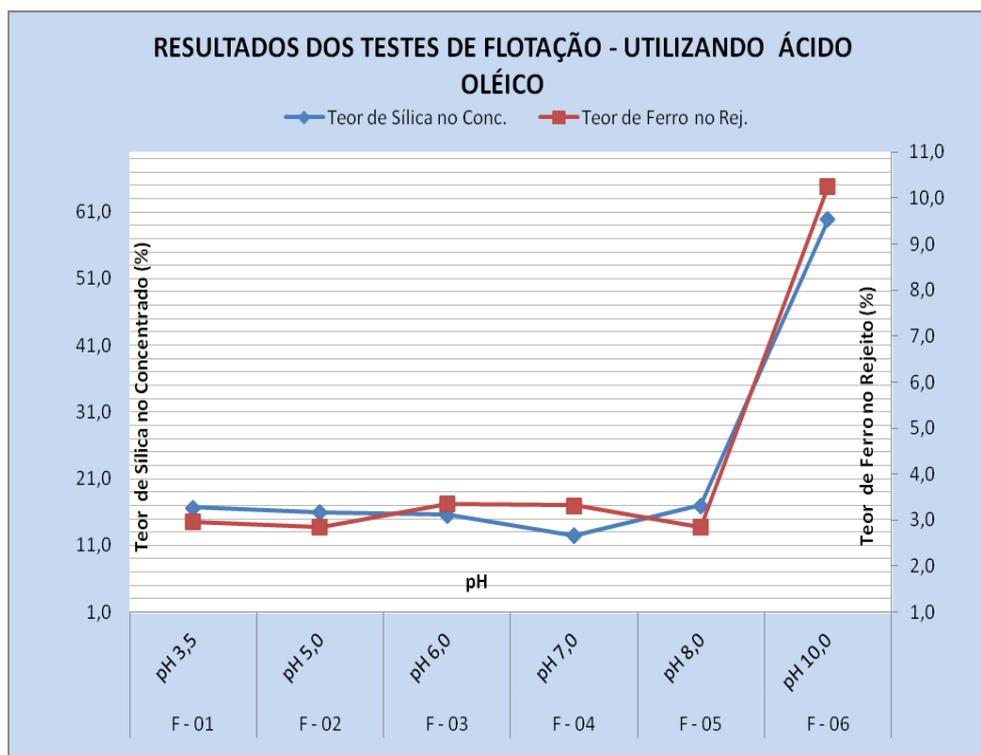


Figura 5.4 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

O teor de sílica no concentrado se apresentou na faixa de 12,49 % a 16,99 %. Observa-se um aumento brusco do teor de sílica para 59,96 % em pH 10,0. O teor de ferro no rejeito se apresentou na faixa de 2,85 % a 3,35 % que podemos considerar estável entre os valores de pH 3,5 a 8,0, mas observa-se um aumento brusco do mesmo em pH 10,0 para 10,26 % .

A figura 5.5 apresenta os resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

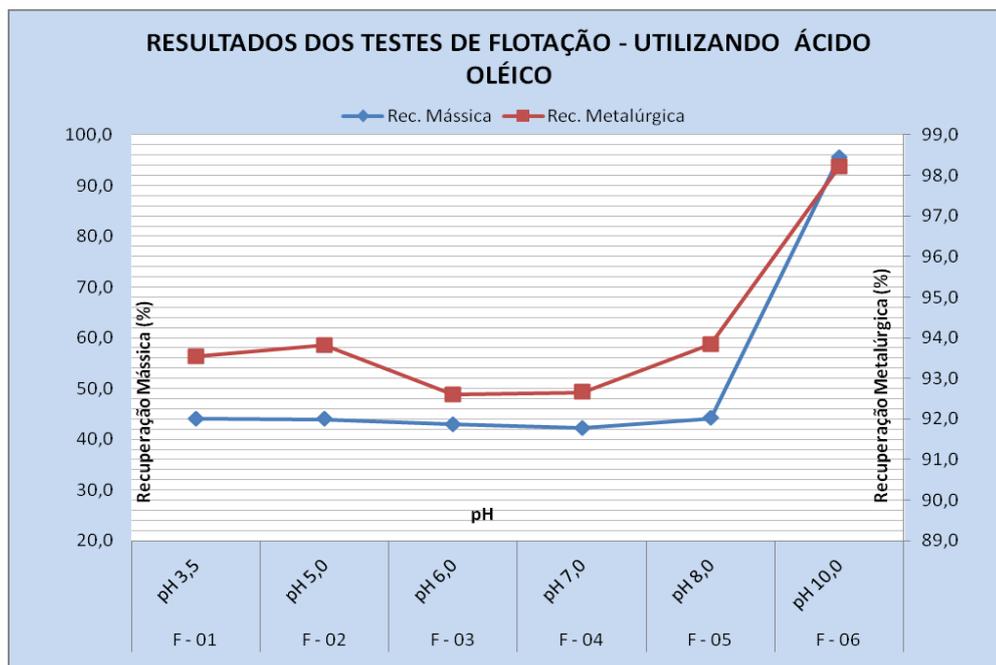


Figura 5.5 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

A recuperação mássica se apresentou na faixa de 42,21 % a 44,13 % entre os valores de pH 3,5 a 8,0, observa – se um aumento brusco da recuperação mássica em pH 10,0 para 95,54 % e a recuperação metalúrgica se apresentou na faixa de 92,61 a 93,84. Observa-se também um acréscimo da mesma para 98,22 % em pH 10,0.

A figura 5.6 apresenta os resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

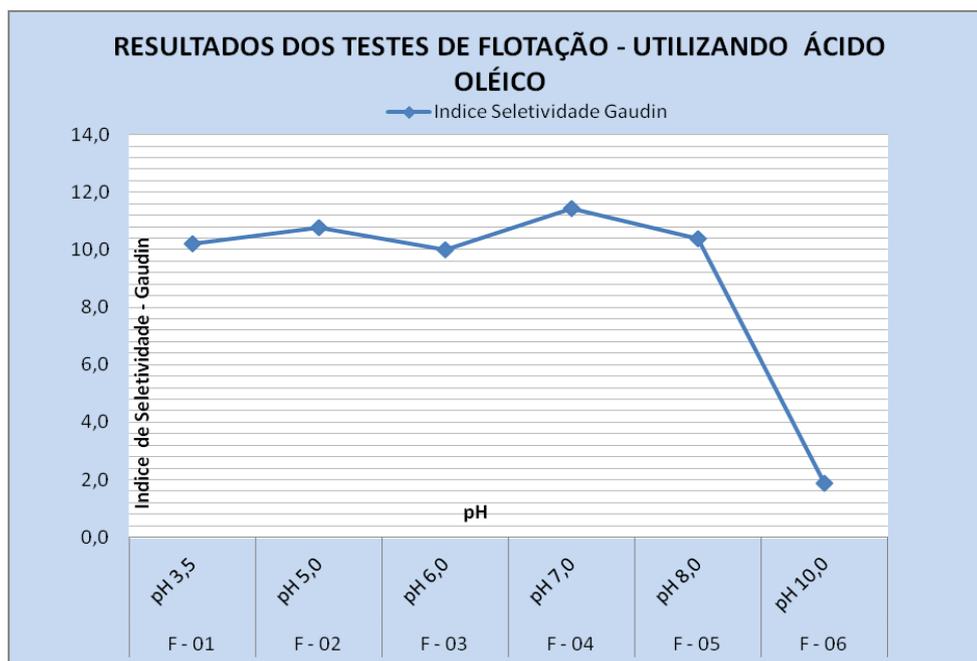


Figura 5.6 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

O índice de seletividade GAUDIN se apresentou na faixa de 10,01 a 11,43 entre os valores de pH 3,5 a 8,0, mas observa-se uma queda brusca do mesmo em pH 10,0 para 1,87.

5.4.2. Resultados dos testes em escala de bancada utilizando o OGVI - óleo graxo vegetal industrial

A tabela 5.5 apresenta os resultados dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente OGVI - óleo graxo vegetal industrial na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

Tabela 5.5 – Resultados dos testes de flotação, utilizando como coletor OGVI - óleo graxo vegetal industrial para avaliação da influência do pH.

Código do Ensaio	Recuperações		IS	Teor		pH	Reagente	
	Mássica	Metalúrgica	Gaudin	SiO ₂ - Conc.	Fe - Rej.		Coletor	Depressor
	(%)	(%)	Adm.	(%)	(%)	Adm.		
F - 07	42,94	90,94	8,35	17,78	4,10	pH 3,5	OGVI - Óleo graxo vegetal industrial	Nenhum
F - 08	44,40	92,58	8,38	20,96	3,40	pH 5,0		
F - 09	48,11	93,08	7,46	24,55	3,43	pH 6,0		
F - 10	43,99	92,45	9,00	18,09	3,48	pH 7,0		
F - 11	47,19	91,22	6,37	26,67	4,12	pH 8,0		
F - 12	96,26	98,08	1,59	59,52	13,02	pH 10,0		

Nos testes de flotação realizados para avaliar a influência do pH utilizando como coletor o OGVI – óleo graxo vegetal industrial, pode ser observado na tabela 5.5 que o pH 7,0 foi o que obteve maior índice de seletividade GAUDIN (9,00), com um teor de sílica no concentrado de 18,09 %, um teor de ferro no rejeito de 3,48 %, uma recuperação mássica de 43,99 % e uma recuperação metalúrgica de 92,45%.

A figura 5.7 apresenta os resultados dos teores de sílica no concentrado e de ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente OGVI - óleo graxo vegetal industrial na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

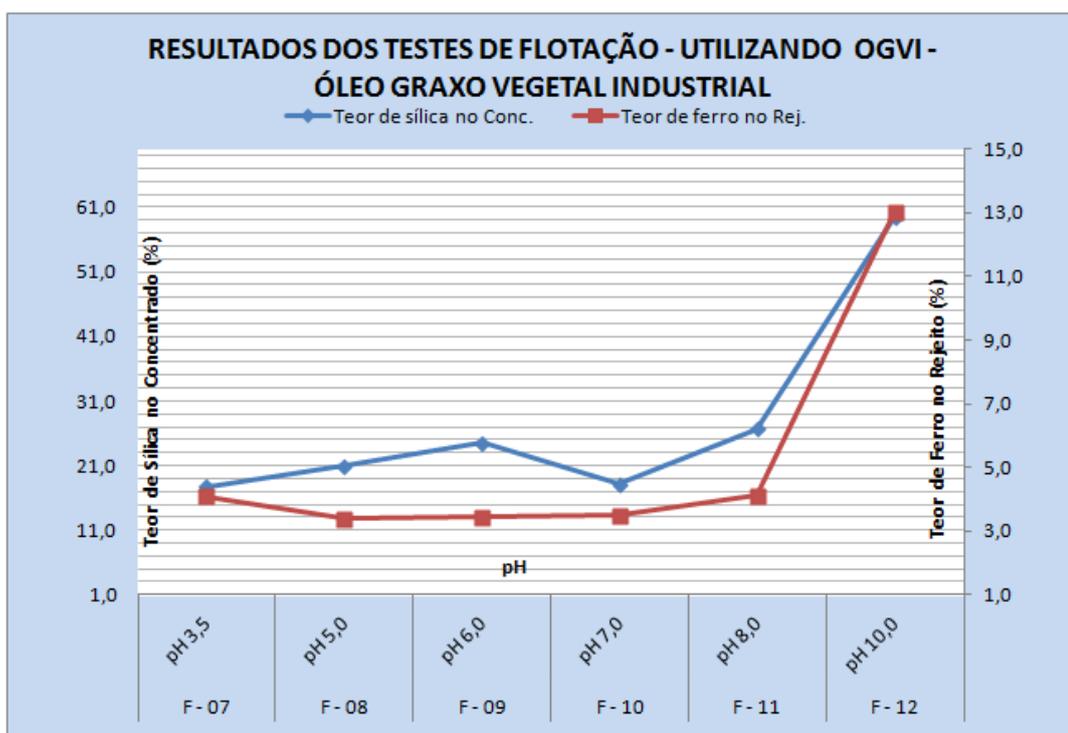


Figura 5.7 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente OGVI - óleo graxo vegetal industrial na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

O teor de sílica no concentrado apresentou-se na faixa de 17,78 % a 26,67 % entre os valores de pH 3,5 a 8,0, mas observa-se um aumento brusco do teor de sílica no concentrado em pH 10,0 para 59,52 %. O teor de ferro no rejeito apresentou-se na faixa de 3,40 % a 4,12 % que podemos considerar o mesmo estável entre os valores de pH 3,5 a 8,0, mas observa-se um aumento brusco do teor de ferro no rejeito em pH 10,0 para 13,02 %.

A figura 5.8 apresenta os resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente OGVI - óleo graxo vegetal industrial na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

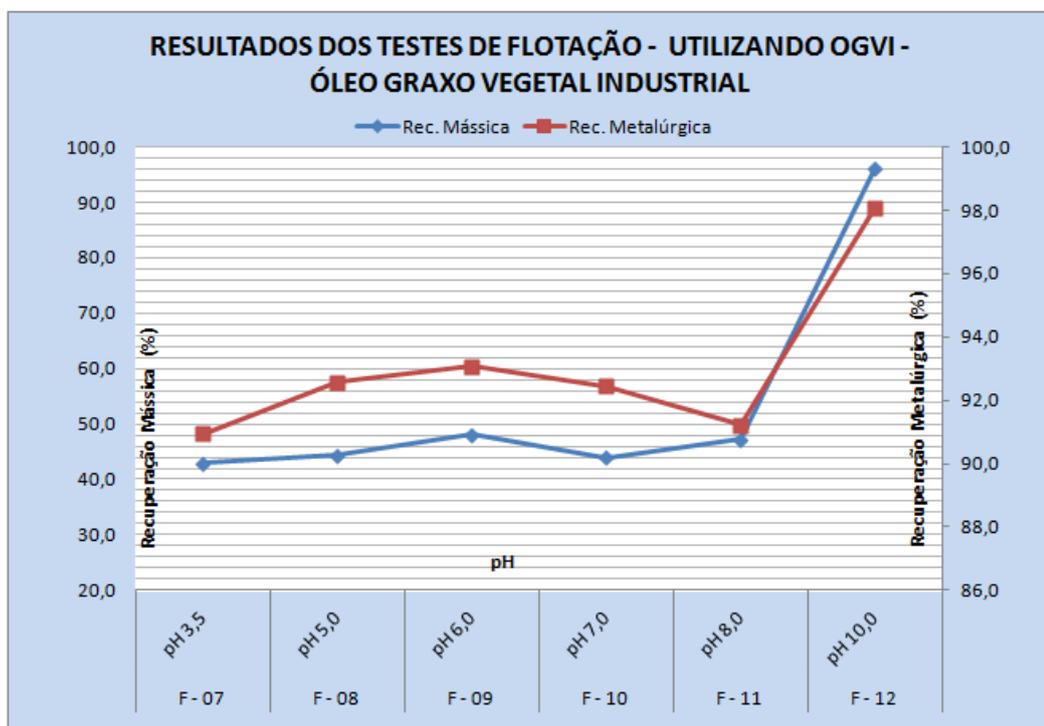


Figura 5.8 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente OGVI - óleo graxo vegetal industrial na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

A recuperação mássica apresentou - se na faixa de 42,94 % a 48,11 % entre os valores de pH 3,5 a 8,0. Observa - se um aumento brusco da recuperação mássica em pH 10,0 para 96,26 % e a recuperação metalúrgica se apresentou na faixa de 90,94 % a 93,08 %. Observa-se também um acréscimo da mesma para 98,08 % em pH 10,0.

A figura 5.9 apresenta os resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente OGVI - óleo graxo vegetal industrial na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

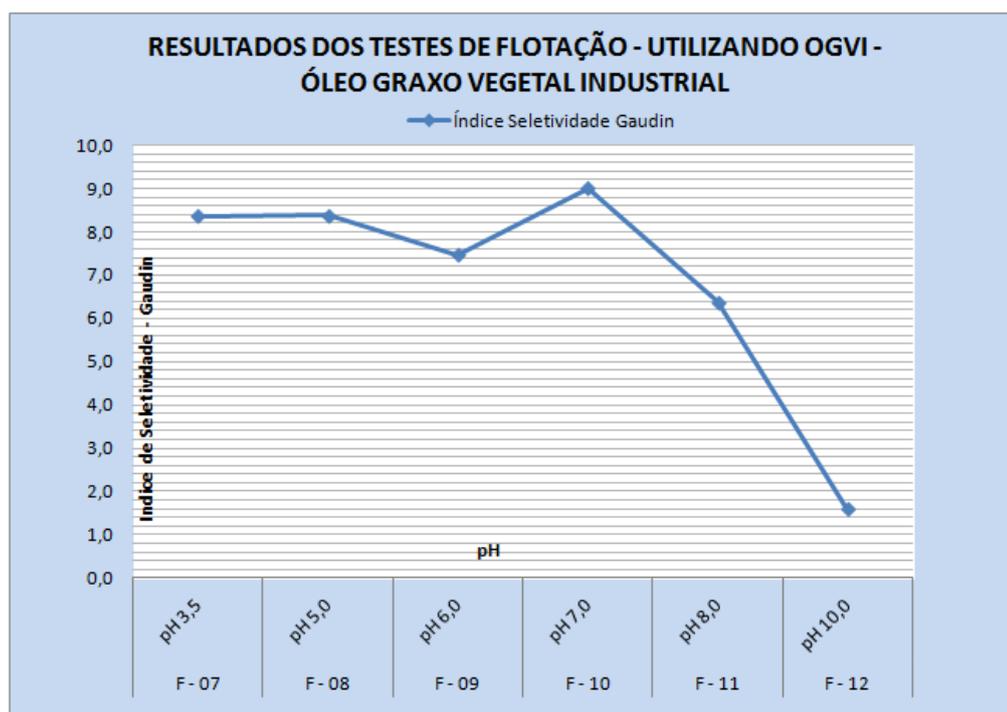


Figura 5.9 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente OGVI - óleo graxo vegetal industrial na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

O índice de seletividade GAUDIN apresentou - se na faixa de 6,37 a 9,00 entre os valores de pH 3,5 a 8,0,mas observa – se uma queda brusca do mesmo em pH 10,0 para 1,58.

5.4.3. Resultados dos testes em escala de bancada utilizando o flotin FS-1

A tabela 5.6 apresenta os resultados dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente flotin FS-1 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

Tabela 5.6 – Resultados dos testes de flotação, utilizando como coletor o flotin FS-1 para avaliação da influência do pH.

Código do Ensaio	Recuperações		IS	Teor		pH	Reagente	
	Mássica	Metalúrgica	Gaudin	SiO ₂ - Conc.	Fe - Rej.	Adm.	Coletor	Depressor
	(%)	(%)	Adm.	(%)	(%)			
F - 13	30,48	64,00	4,12	18,80	13,36	pH 3,5	Flotin FS-1	Nenhum
F - 14	58,27	93,33	4,98	37,58	4,15	pH 5,0		
F - 15	59,73	93,36	4,92	36,47	4,23	pH 6,0		
F - 16	54,36	94,11	6,24	32,38	3,32	pH 7,0		
F - 17	79,60	96,74	3,64	53,12	4,09	pH 8,0		
F - 18	93,51	98,37	2,49	59,07	6,44	pH 10,0		

Nos testes de flotação realizados para avaliar a influência do pH utilizando como coletor flotin FS-1, pode ser observado na tabela 5.6, que o pH 7,0 foi o que obteve maior índice de seletividade GAUDIN (6,24), com um teor de sílica no concentrado de 32,28 %, um teor de ferro no rejeito de 3,32 %, uma recuperação mássica de 54,36 % e uma recuperação metalúrgica de 94,11%.

A figura 5.10 apresenta os resultados dos teores de sílica no concentrado e de ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente flotin FS-1 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

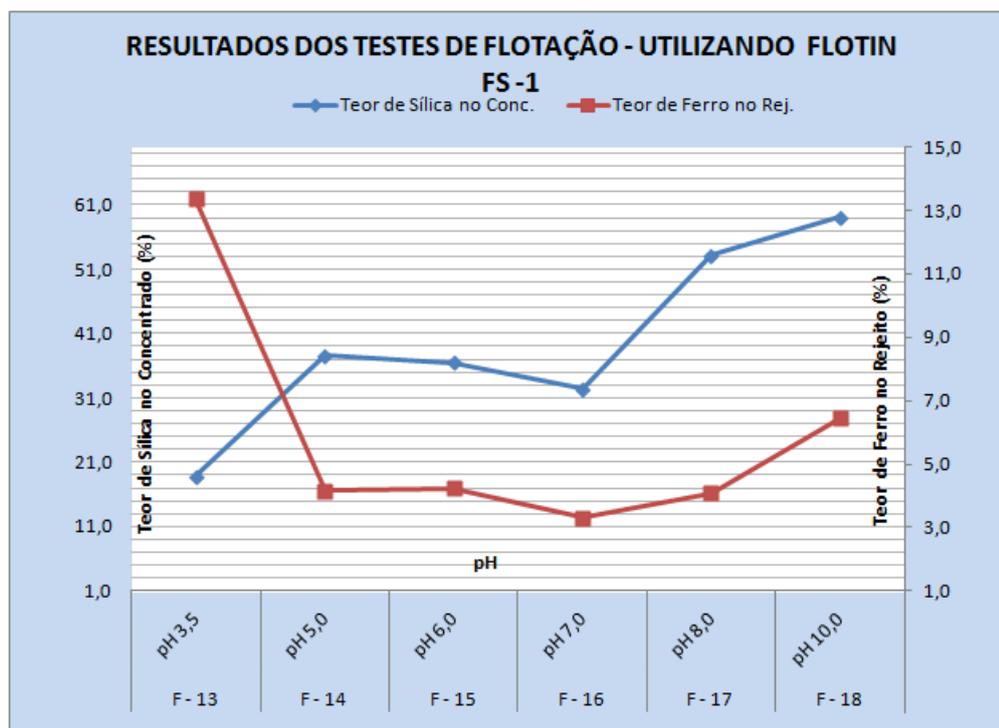


Figura 5.10 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente flotín FS-1 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

O teor de sílica no concentrado apresentou-se na faixa de 32,38 % a 59,07 % entre os pH's 5,0 a 10,0. Observa-se um decréscimo do mesmo em pH 3,5 para 18,80 %. O teor de ferro no rejeito apresentou-se na faixa de 3,32 % a 6,44 % entre os valores de pH 5,0 a 10,0, mas observa-se um aumento do mesmo em pH 3,5 para 13,36 %.

A figura 5.11 apresenta os resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente flotín FS-1 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

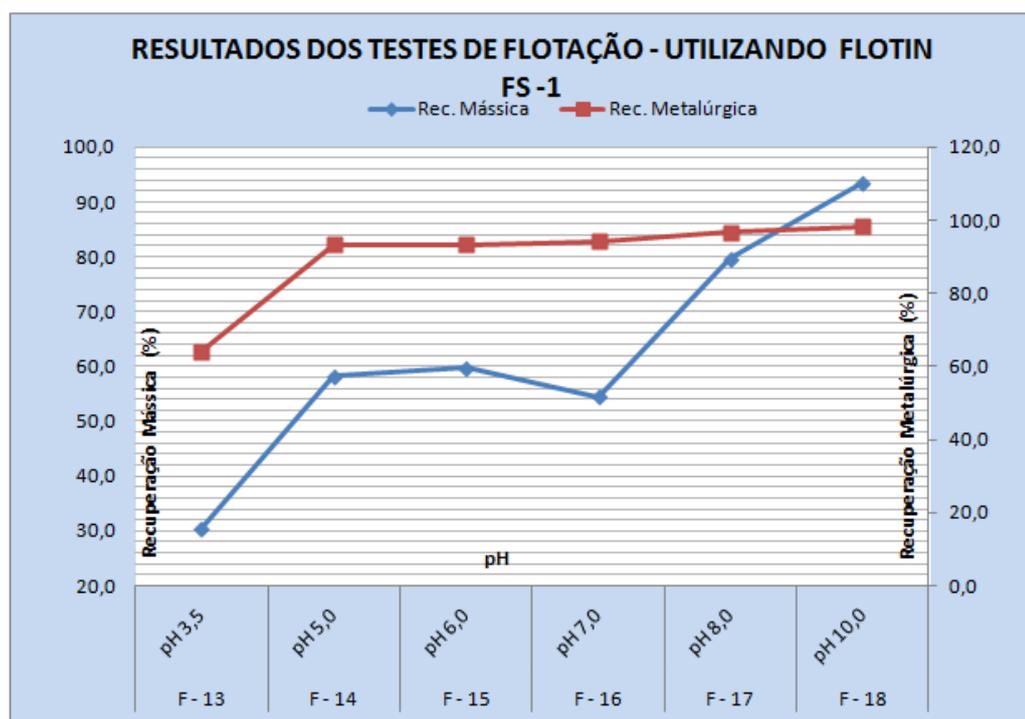


Figura 5.11 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente óleo flotin FS-1 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

A recuperação mássica se apresentou na faixa de 54,36 % a 93,51 % entre os valores de pH 5,0 a 10,0. Observa-se uma redução da recuperação mássica em pH 3,5 para 30,48 % e a recuperação metalúrgica se apresentou na faixa de 93,33 % a 98,37 %, entre os valores de pH 5,0 a 10,0. Observa-se também um decréscimo da mesma para 64,0 % em pH 3,5.

A figura 5.12 apresenta os resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente flotin FS-1 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

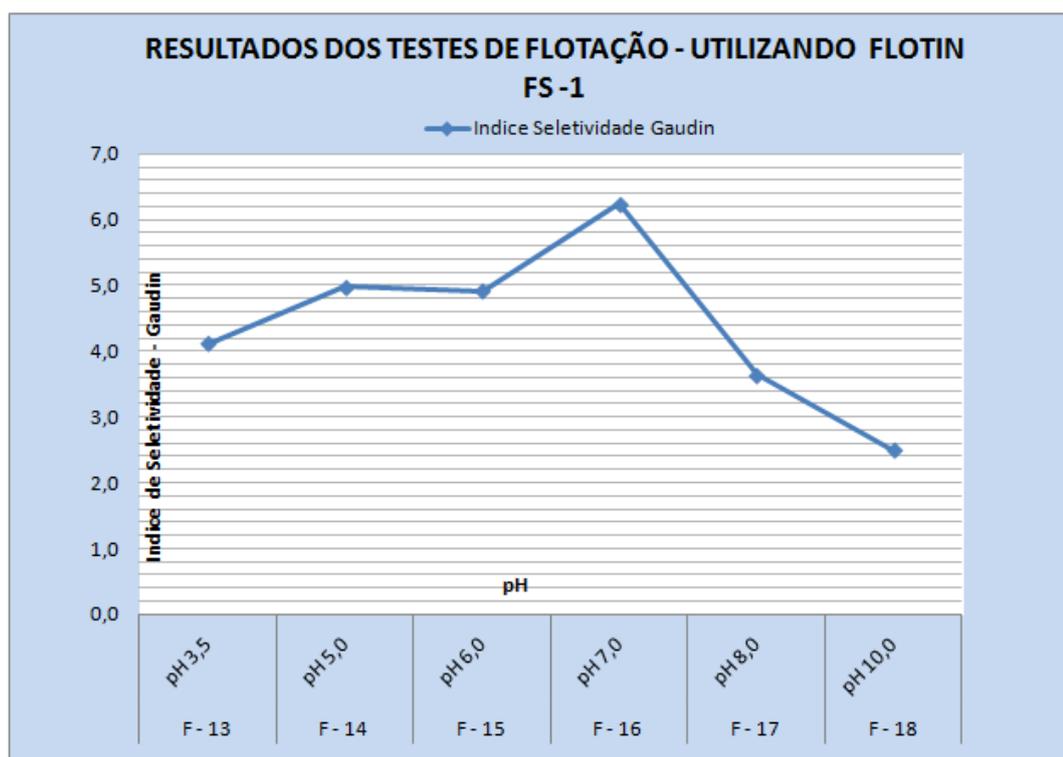


Figura 5.12 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente flotín FS-1 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

O índice de seletividade GAUDIN se apresentou na faixa de 2,49 a 6,24 entre os valores de pH 3,5 a 10,0. O melhor resultado foi obtido em pH 7.

5.4.4. Resultados dos testes em escala de bancada utilizando o flotín FS-2

A tabela 5.7 apresenta os resultados dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente flotín FS-2 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

Tabela 5.7 – Resultados dos testes de flotação, utilizando como flotin FS-2 para avaliação da influência do pH.

Código do Ensaio	Recuperações		IS	Teor		pH	Reagente	
	Mássica	Metalúrgica	Gaudin	SiO ₂ - Conc.	Fe - Rej.	Adm.	Coletor	Depressor
	(%)	(%)	Adm.	(%)	(%)			
F - 19	43,32	88,86	7,00	19,51	5,06	pH 3,5	Flotín FS-2	Nenhum
F - 20	53,26	96,41	8,81	29,19	1,97	pH 5,0		
F - 21	49,88	95,60	9,03	25,73	2,25	pH 6,0		
F - 22	47,49	94,29	8,72	22,87	2,79	pH 7,0		
F - 23	62,81	92,06	3,82	42,52	5,48	pH 8,0		
F - 24	83,81	94,21	2,15	56,99	9,14	pH 10,0		

Nos testes de flotação realizados para avaliar a influência do pH utilizando como coletor flotín FS-2, pode ser observado na tabela 5.7 que o pH 6,0 foi o que obteve maior índice de seletividade GAUDIN (9,03), com um teor de sílica no concentrado de 25,73 %, um teor de ferro no rejeito de 2,25 %, uma recuperação mássica de 49,88 % e uma recuperação metalúrgica de 95,60%.

A figura 5.13 apresenta os resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente flotín FS-2 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

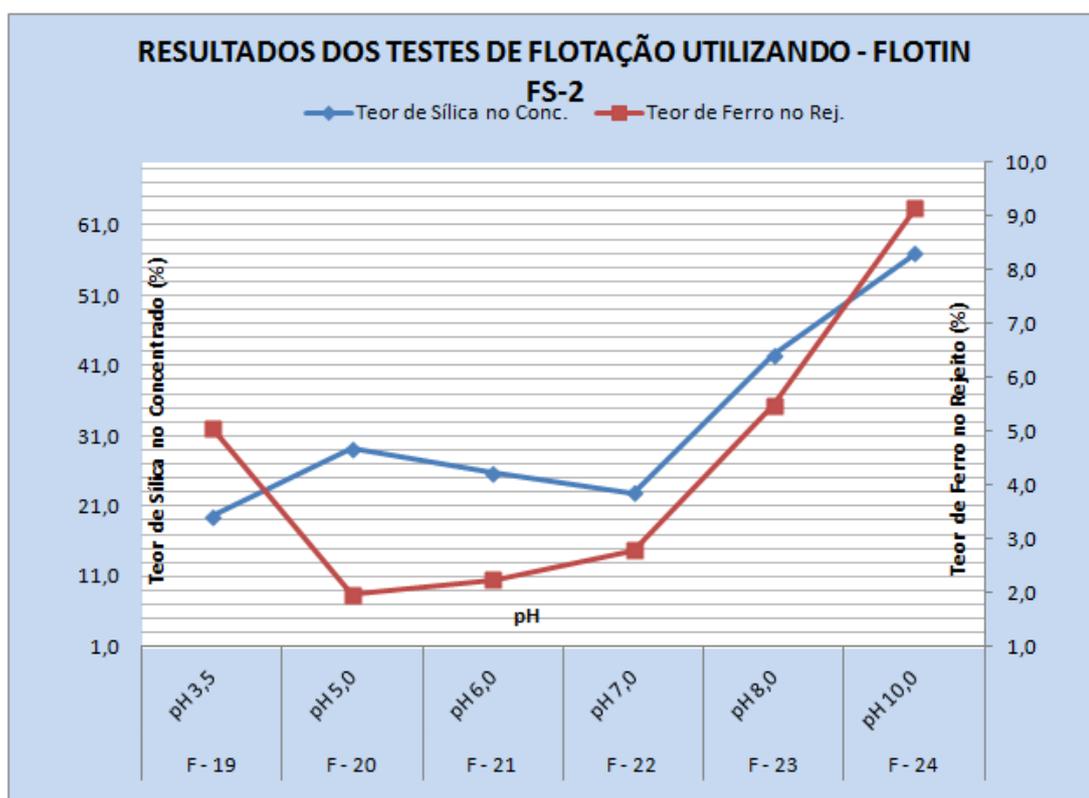


Figura 5.13 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente flotin FS-2 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

O teor de sílica no concentrado apresentou-se na faixa de 19,51 % a 56,99 % entre os valores de pH 3,5 a 10,0, e o teor de ferro no rejeito se apresentou na faixa de 1,97 % a 9,14 % entre os valores de pH 3,5 a 10,0.

A figura 5.14 apresenta os resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente flotin FS-2 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

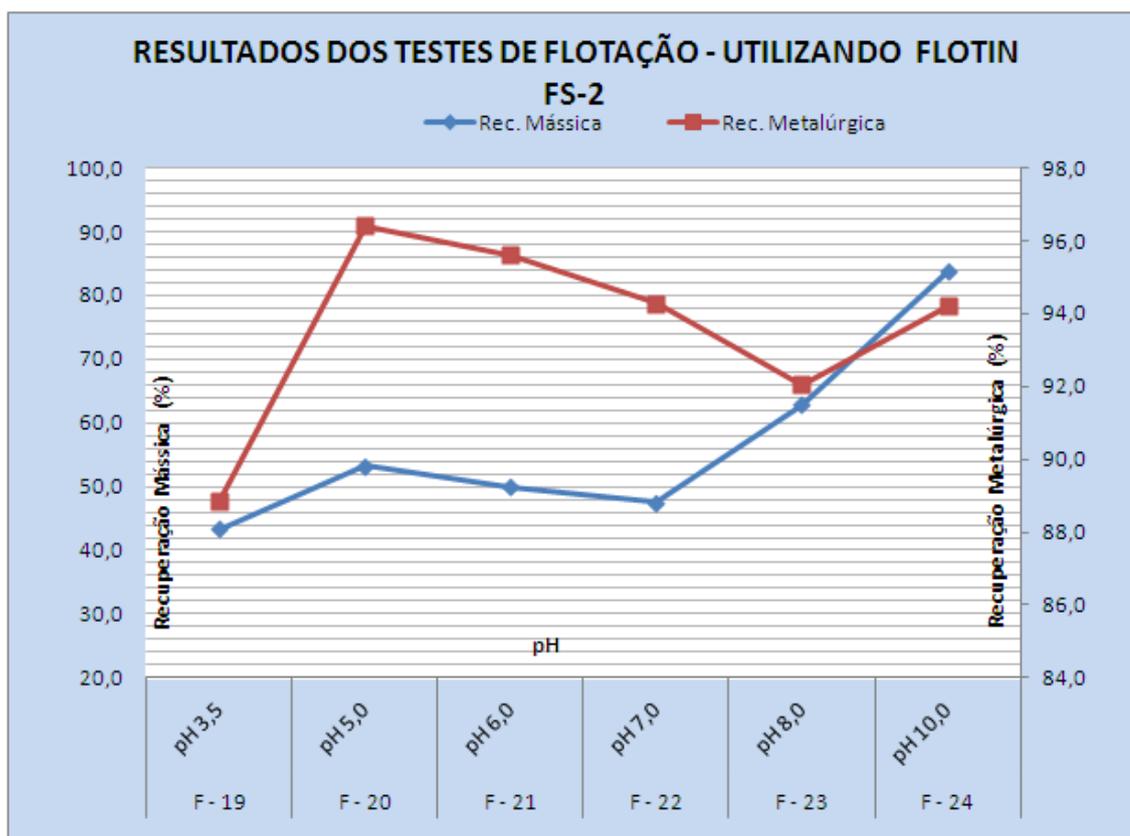


Figura 5.14 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente flotín FS-2 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

A recuperação mássica se apresentou na faixa de 43,32 % a 83,81 % entre os valores de pH 3,5 a 10,0, e a recuperação metalúrgica se apresentou na faixa de 88,86 % a 96,41 %, entre os valores de pH 3,5 a 10,0.

A figura 5.15 apresenta os resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente flotín FS-2 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

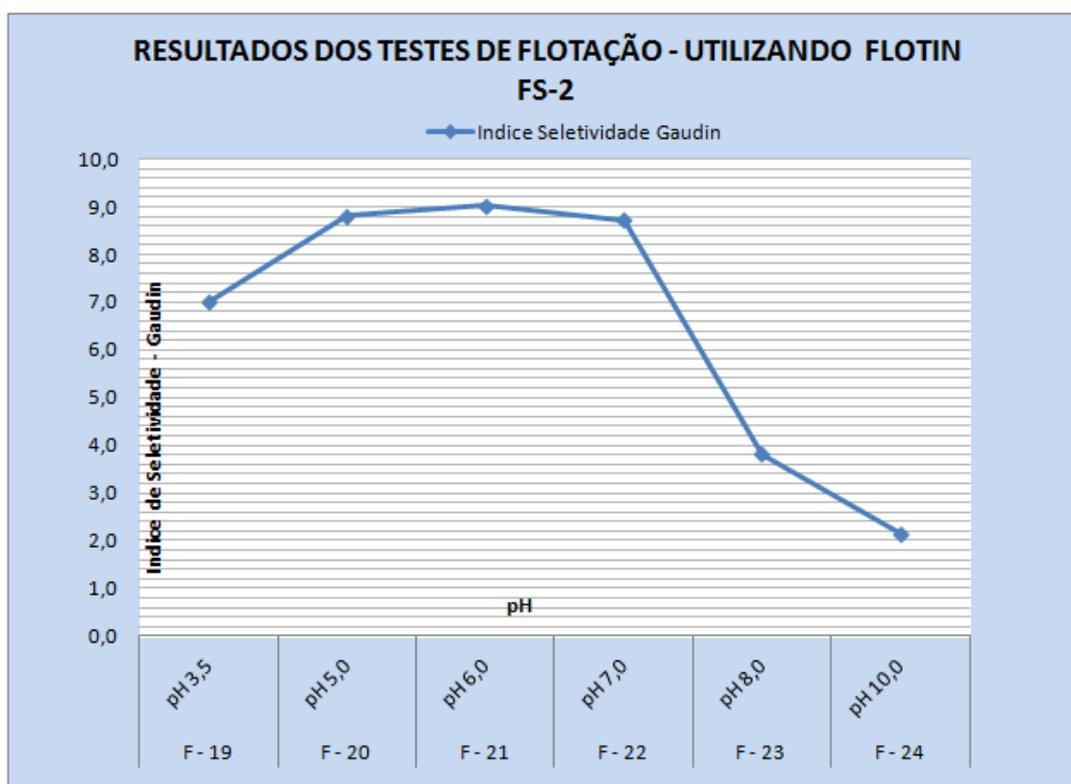


Figura 5.15 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente flotín FS-2 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

O índice de seletividade GAUDIN se apresentou na faixa de 2,15 a 9,03 entre os valores de pH 3,5 a 10,0.

5.4.5. Resultados dos testes em escala de bancada utilizando o óleo de pinho

A tabela 5.8 apresenta os resultados dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente óleo de pinho na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

Tabela 5.8 – resultados dos testes de flotação, utilizando o óleo de pinho como coletor para avaliação da influência do pH.

Código do Ensaio	Recuperações		IS	Teor		pH	Reagente	
	Mássica (%)	Metalúrgica (%)	Gaudin Adm.	SiO ₂ - Conc. (%)	Fe - Rej. (%)		Coletor	Depressor
F - 25	14,93	33,06	3,82	13,33	20,22	pH 3,5	Óleo de Pinho	Nenhum
F - 26	57,51	92,58	4,82	36,67	4,51	pH 5,0		
F - 27	71,05	96,47	4,70	47,65	3,13	pH 6,0		
F - 28	80,85	96,45	3,37	51,87	4,78	pH 7,0		
F - 29	3,15	3,33	1,05	57,19	25,65	pH 8,0		

Nos testes de flotação realizados para avaliar a influência do pH utilizando como coletor o óleo de pinho, pode ser observado na tabela 5.8 que o pH 5,0 foi o que obteve maior índice de seletividade GAUDIN (4,82), com um teor de sílica no concentrado de 36,67 %, um teor de ferro no rejeito de 4,51 %, uma recuperação mássica de 57,51 % e uma recuperação metalúrgica de 92,58%.

A figura 5.16 apresenta os resultados dos teores de e sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente óleo de pinho na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

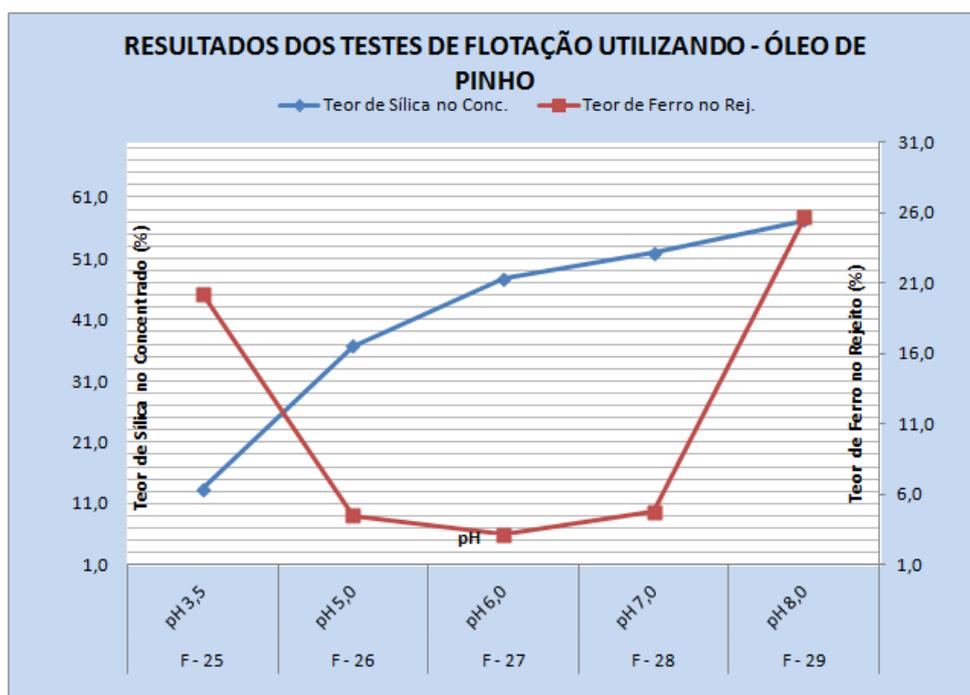


Figura 5.16 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente óleo de pinho na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

O teor de sílica no concentrado se apresentou na faixa de 13,33% a 51,87 % entre os valores de pH 3,5 a 7,0, mas teve um acréscimo para 57,19 % em pH 8,0. O teor de ferro no rejeito se apresentou na faixa de 3,13 % a 20,22 % entre os valores de pH 3,5 a 7,0 e o mesmo teve um acréscimo para 25,65 % em pH 8,0.

A figura 5.17 apresenta os resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente óleo de pinho na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

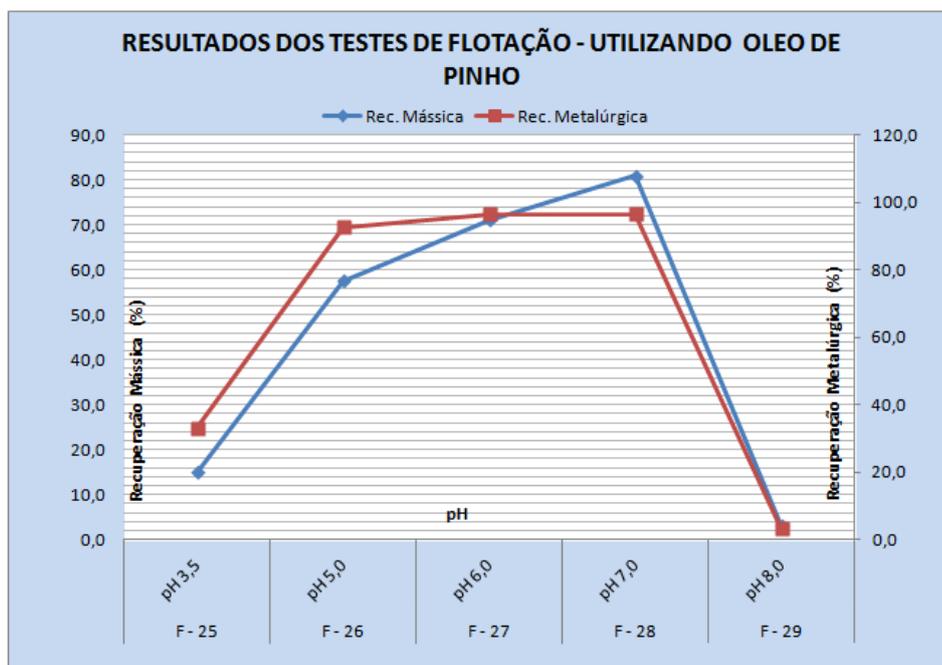


Figura 5.17 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente óleo de pinho na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

A recuperação mássica se apresentou na faixa de 14,93 % a 80,85 % entre os valores de pH 3,5 a 7,0, mas apresentou uma redução brusca em pH 8,0 para 3,15 % e a recuperação metalúrgica se apresentou na faixa de 33,06 % a 96,45 %, entre os valores de pH 3,5 a 7,0, também apresentou uma redução brusca em pH 8,0 para 3,33 %.

A figura 5.18 apresenta os resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente óleo de pinho na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

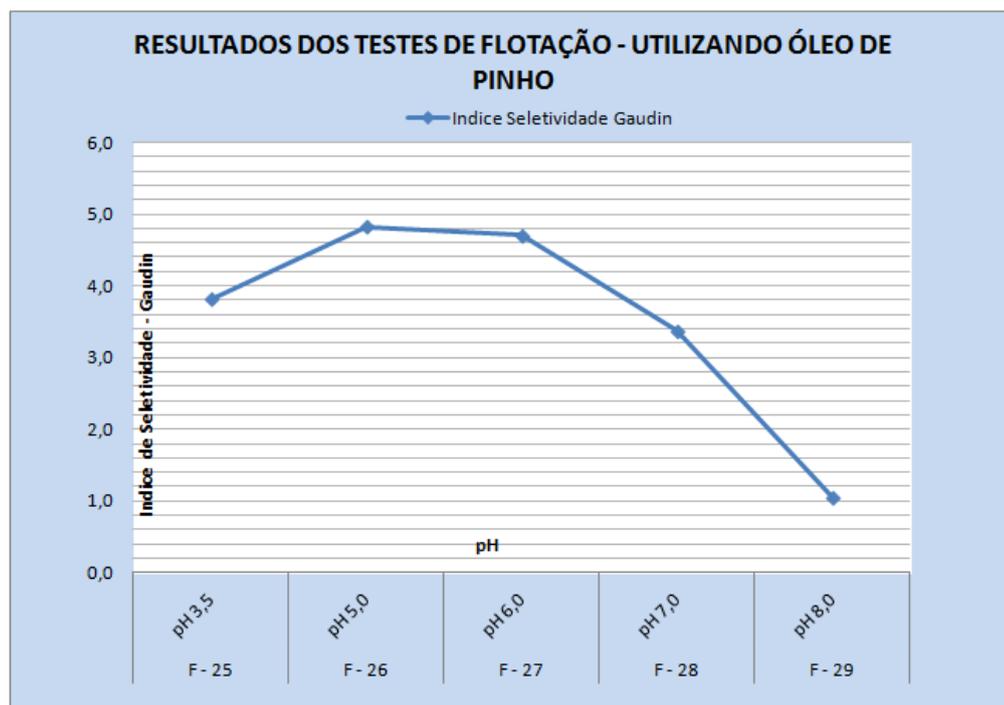


Figura 5.18 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada utilizando como coletor o reagente óleo de pinho na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do pH.

O índice de seletividade GAUDIN se apresentou na faixa de 3,37 a 4,82 entre os valores de pH 3,5 a 7,0 e teve uma queda para 1,05 em pH 8,0.

Para o reagente coletor óleo de pinho em pH 10,0, não aconteceu o processo de concentração por flotação.

5.4.6. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 3,5, variando os tipos de reagentes coletores

A tabela 5.9 apresenta os resultados dos testes de flotação em escala de bancada em pH 3,5, na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

Tabela 5.9 – Resultados dos testes de flotação em pH 3,5, variando os tipos de coletores.

Código do Ensaio	Recuperações		IS	Teor		pH	Reagente	
	Mássica	Metalúrgica	Gaudin	SiO ₂ - Conc.	Fe - Rej.		Adm.	Coletor
	(%)	(%)	Adm.	(%)	(%)			
F - 01	44,08	93,54	10,22	16,68	2,97	3,5	Ácido Oléico	Nenhum
F - 07	42,94	90,94	8,35	17,78	4,10		OGVI	
F - 13	30,48	64,00	4,12	18,80	13,36		Flotin FS-1	
F - 19	43,32	88,86	7,00	19,51	5,06		Flotin FS-2	
F - 25	14,93	33,06	3,82	13,33	20,22		Óleo de Pinho	

Nos testes de flotação realizados para avaliar a influência dos reagentes coletores em pH 3,5, pode ser observado na tabela 5.9, que o coletor ácido oléico obteve o maior índice de seletividade GAUDIN (10,22), com um teor de sílica no concentrado de 16,68 %, um teor de ferro no rejeito de 2,97 %, uma recuperação mássica de 44,08 % e uma recuperação metalúrgica de 93,54% . O coletor OGVI óleo graxo vegetal industrial obteve o segundo melhor índice de seletividade GAUDIN (8,35) com um teor de sílica no concentrado de 17,78 %, um teor de ferro no rejeito de 4,10 %, uma recuperação mássica de 42,94 % e uma recuperação metalúrgica de 90,94%.

A figura 5.19 apresenta os resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 3,5, na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

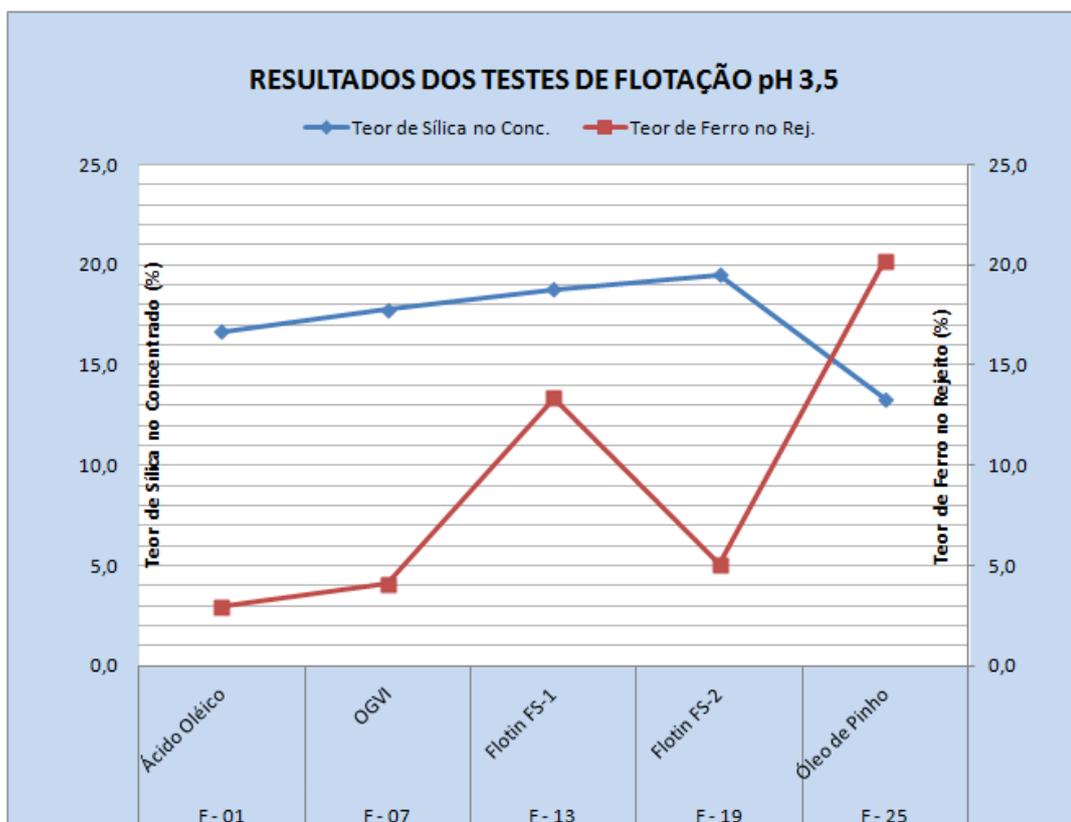


Figura 5.19 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 3,5 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

O teor de sílica no concentrado para o pH 3,5 dos coletores estudados se apresentou na faixa de 16,68 % a 19,51 %, com exceção do coletor óleo de pinho que apresentou um teor de 13,33 %. O teor de ferro no rejeito para o pH 3,5, se apresentou na faixa de 2,97 % a 13,33 % com exceção do coletor óleo de pinho que apresentou um teor de ferro no rejeito de 20,22 %.

A figura 5.20 apresenta os resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 3,5, na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

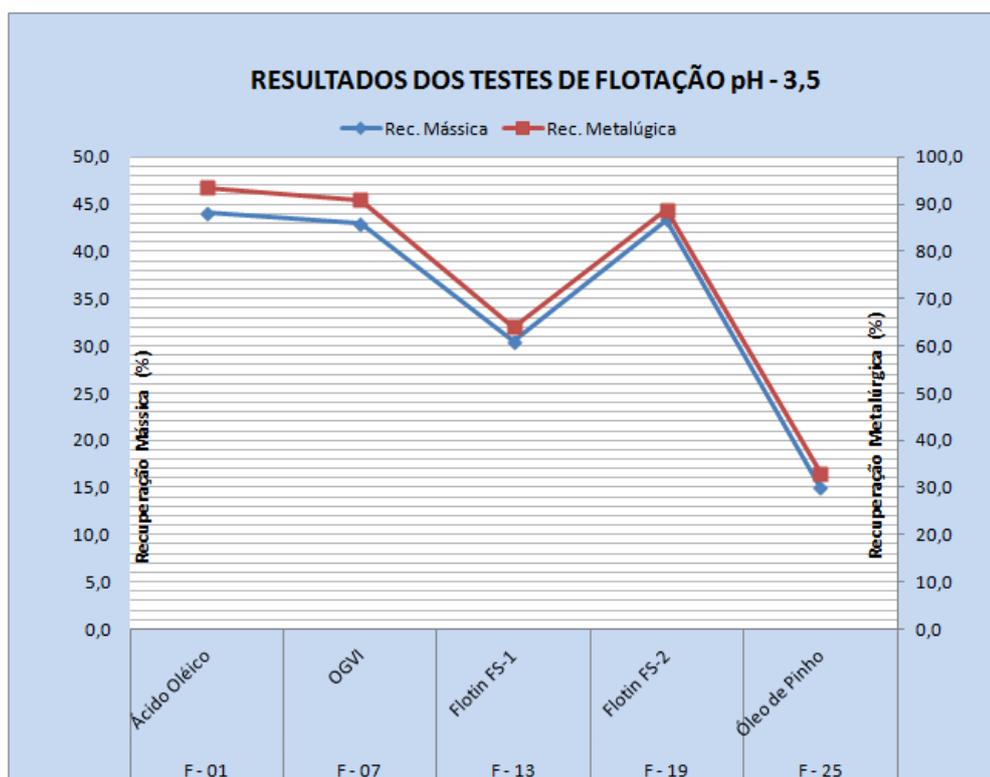


Figura 5.20 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 3,5 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor

A recuperação mássica apresentou - se na faixa de 42,94 % a 44,08 % em pH 3,5 para os coletores ácido oléico, OGVI óleo graxo vegetal industrial e flotín FS-2, o para o coletor flotín FS-1a recuperação em massa foi de 30,48 % e para o coletor óleo de pinho, a recuperação foi de 14,93 %. A recuperação metalúrgica apresentou-se na faixa de 88,86 % a 93,54 % em pH 3,5 para os coletores ácido oleico,OGVI óleo graxo vegetal industrial e flotín FS-2. Para o coletor flotín FS-1 a recuperação metalúrgica foi de 64,00 % e para o coletor óleo de pinho a recuperação metalúrgica foi de 33,06 %.

A figura 5.21 apresenta os resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 3,5 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

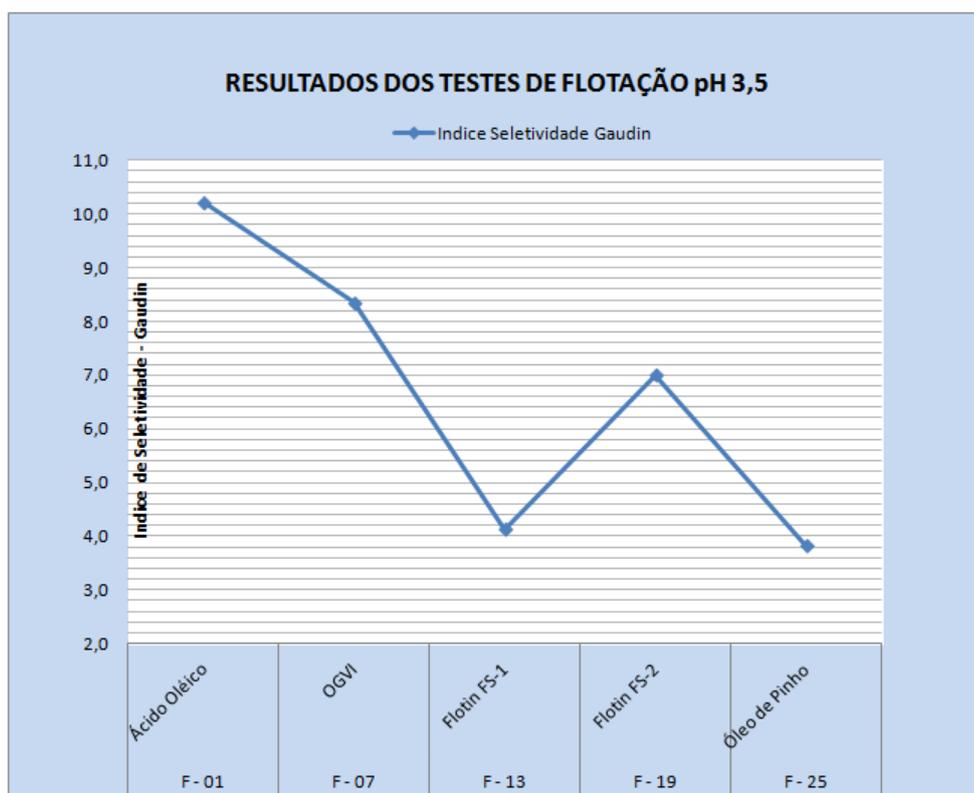


Figura 5.21 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 3,5 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

O índice de seletividade GAUDIN se apresentou na faixa de 7,00 a 10,22 em pH 3,5 para os coletores ácido oléico, OGVI óleo graxo vegetal industrial e flotín FS-2. Para o coletor flotín FS-1, o índice de seletividade foi de 4,12 e para o coletor óleo de pinho, o índice de seletividade foi de 3,82.

5.4.7. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 5,0, variando os tipos de reagentes coletores

A tabela 5.10 apresenta os resultados dos testes de flotação em escala de bancada em pH 5,0, na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

Tabela 5.10 – Resultados dos testes de flotação em pH 5,0, variando os tipos de coletores.

Código do Ensaio	Recuperações		IS	Teor		pH	Reagente	
	Mássica	Metalúrgica	Gaudin	SiO ₂ - Conc.	Fe - Rej.		Adm.	Coletor
	(%)	(%)	Adm.	(%)	(%)			
F - 02	43,96	93,81	10,78	15,97	2,85	5,0	Ácido Oléico	Nenhum
F - 08	44,40	92,58	8,38	20,96	3,40		OGVI	
F - 14	58,27	93,33	4,98	37,58	4,15		Flotin FS-1	
F - 20	53,26	96,41	8,81	29,19	1,97		Flotin FS-2	
F - 26	57,51	92,58	4,82	36,67	4,51		Óleo de Pinho	

Nos testes de flotação realizados para avaliar a influência dos reagentes coletores em pH 5,0, pode ser observado na tabela 5.10 que o coletor ácido oléico obteve maior índice de seletividade GAUDIN (10,78) com um teor de sílica no concentrado de 15,97 %, um teor de ferro no rejeito de 2,85 %, uma recuperação mássica de 43,96 % e uma recuperação metalúrgica de 93,81%. O coletor flotin FS-2 obteve um segundo melhor índice de seletividade GAUDIN (8,81) com um teor de sílica no concentrado de 29,19 %, um teor de ferro no rejeito de 1,97 %, uma recuperação mássica de 53,26 % e uma recuperação metalúrgica de 96,41%.

A figura 5.22 apresenta os resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 5,0, na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

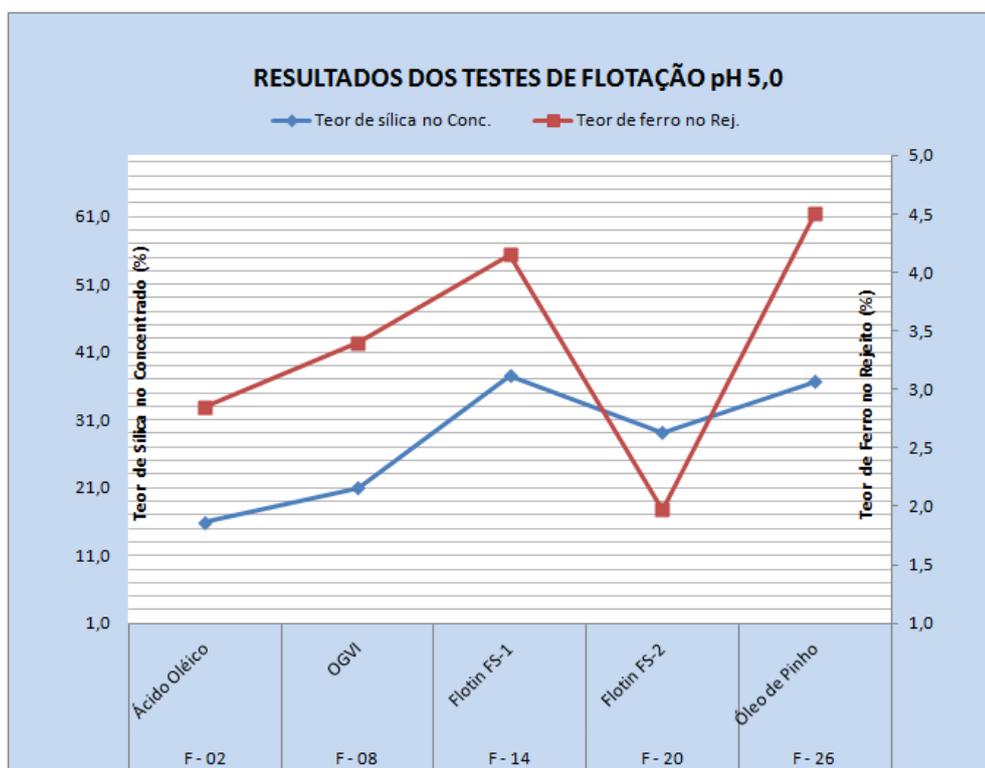


Figura 5.22 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 5,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

O teor de sílica no concentrado para o pH 5,0 dos coletores estudados se apresentou na faixa de 15,97 % a 29,19 %, com exceção do coletor óleo de pinho que apresentou um teor de 36,67 % e do coletor flotín FS-1 que apresentou um teor de 36,67 %. O teor de ferro no rejeito para o pH 5,0, se apresentou na faixa de 2,85 % a 4,51 %.

A figura 5.23 apresenta os resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 5,0, na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

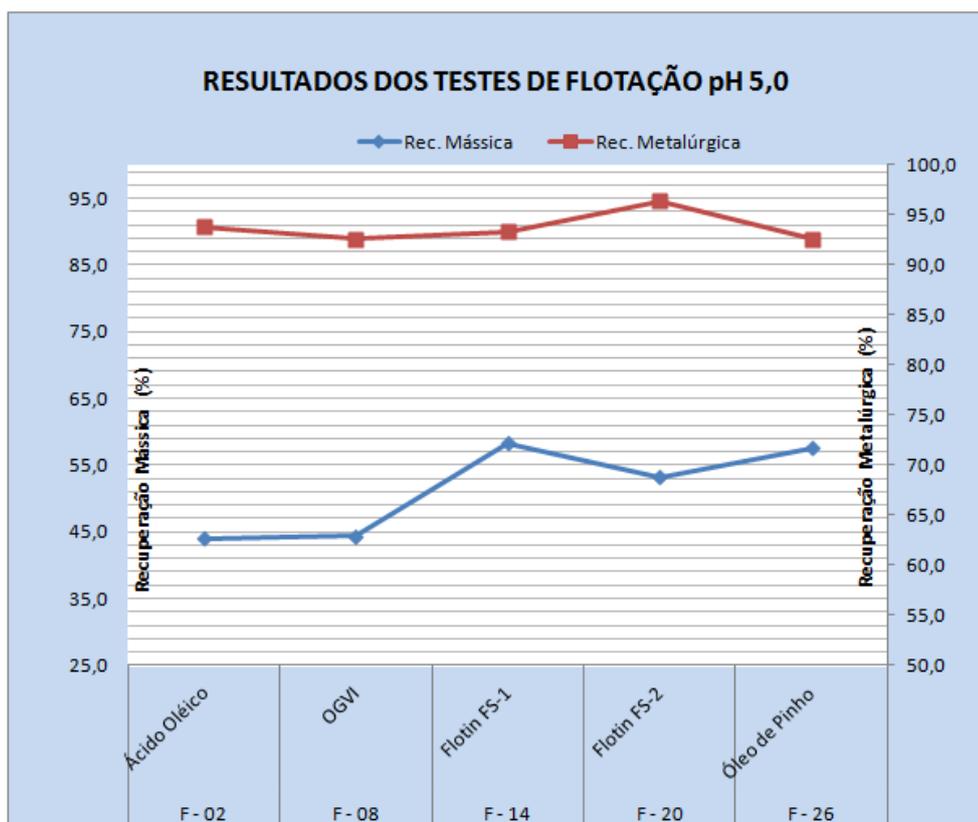


Figura 5.23 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 5,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

A recuperação mássica apresentou - se na faixa de 43,96 % a 58,27 % e a recuperação metalúrgica apresentou-se na faixa de 92,58 % a 96,41 %, em pH 5,0 para os coletores estudados.

A figura 5.24 apresenta os resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 5,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

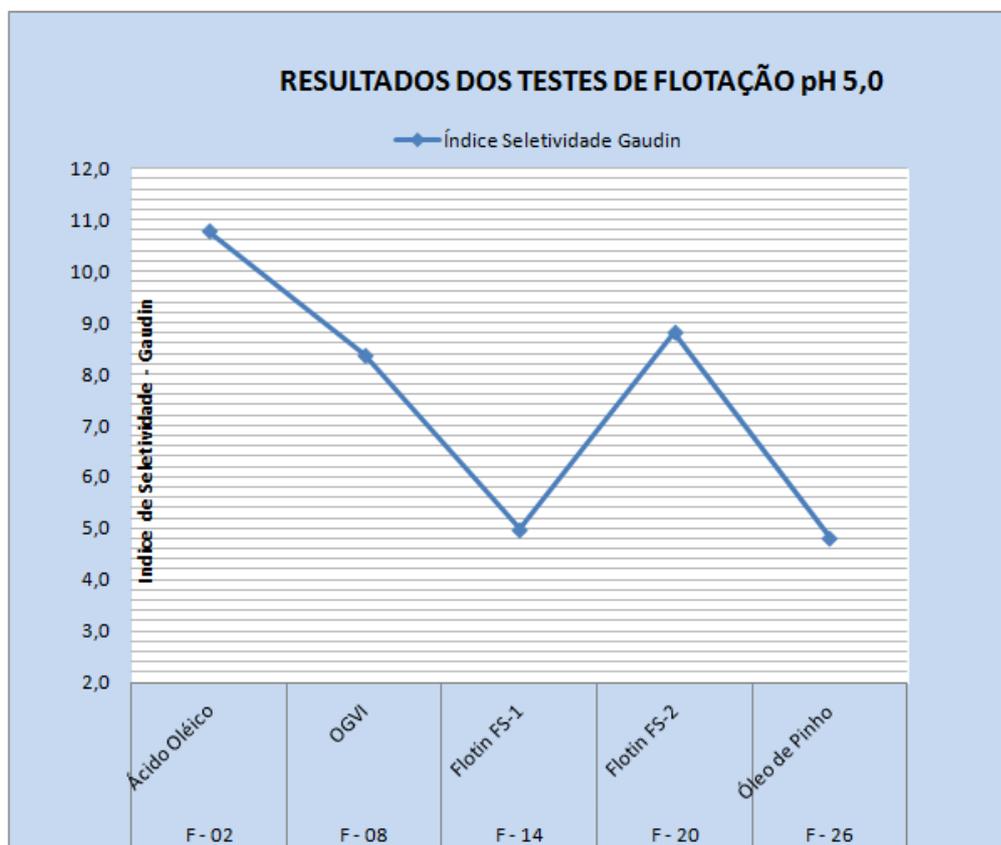


Figura 5.24 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 5,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

O índice de seletividade GAUDIN se apresentou na faixa de 8,38 a 10,78 em pH 5,0 para os coletores ácido oléico, OGVI óleo graxo vegetal industrial e flotín FS-2. Para o coletor flotín FS-1 o índice de seletividade foi de 4,98 e para o coletor óleo de pinho o índice de seletividade foi de 4,82.

5.4.8. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 6,0, variando os tipos de reagentes coletores

A tabela 5.11 apresenta os resultados dos testes de flotação em escala de bancada em pH 6,0, na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

Tabela 5.11 – Resultados dos testes de flotação em pH 6,0, variando os tipos de coletores.

Código do Ensaio	Recuperações		IS	Teor		pH	Reagente	
	Mássica	Metalúrgica	Gaudin	SiO ₂ - Conc.	Fe - Rej.		Coletor	Depressor
	(%)	(%)	Adm.	(%)	(%)	Adm.		
F - 03	43,00	92,61	10,01	15,62	3,35	pH 6,0	Ácido Oléico	Nenhum
F - 09	48,11	93,08	7,46	24,55	3,43		OGVI	
F - 15	59,73	93,36	4,92	36,47	4,23		Flotin FS-1	
F - 21	49,88	95,60	9,03	25,73	2,25		Flotin FS-2	
F - 27	71,05	96,47	4,70	47,65	3,13		Óleo de Pinho	

Nos testes de flotação realizados para avaliar a influência dos reagentes coletores em pH 6,0, pode ser observado na tabela 5.11, que o coletor ácido oléico obteve o maior índice de seletividade GAUDIN (10,01) com um teor de sílica no concentrado de 15,62 %, um teor de ferro no rejeito de 3,35 %, uma recuperação mássica de 43,00 % e uma recuperação metalúrgica de 92,61%. O coletor flotin FS-2 obteve um segundo melhor índice de seletividade GAUDIN (9,03) com um teor de sílica no concentrado de 25,73 %, um teor de ferro no rejeito de 2,25 %, uma recuperação mássica de 49,88 % e uma recuperação metalúrgica de 95,60 %.

A figura 5.25 apresenta os resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 6,0, na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

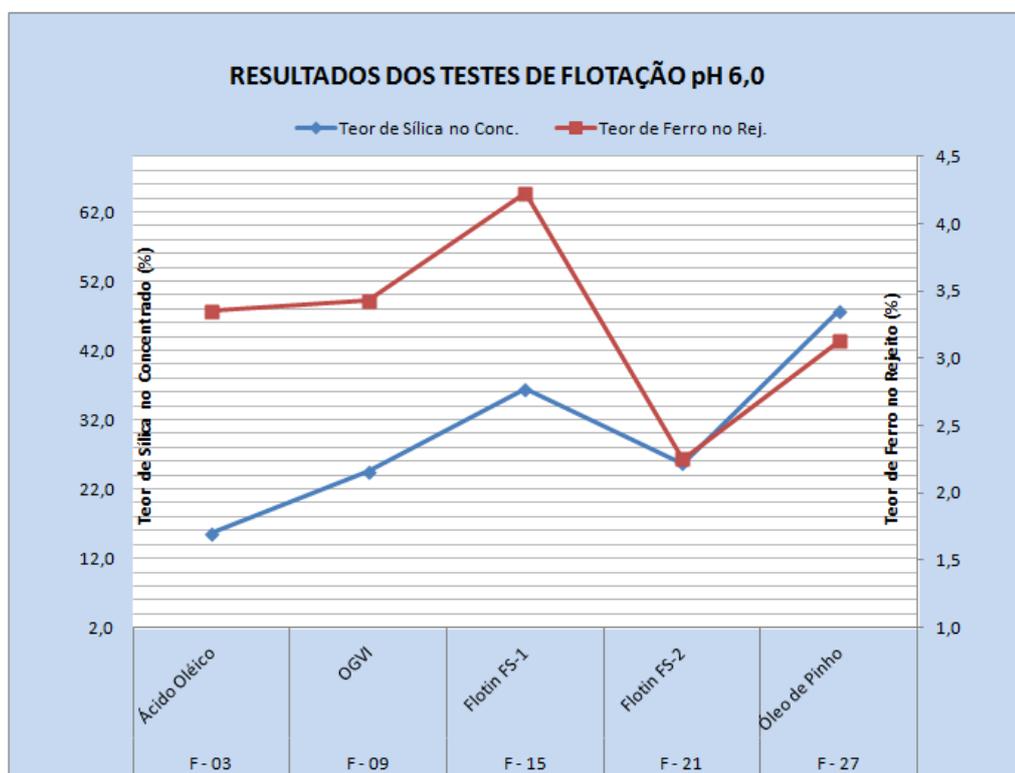


Figura 5.25 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 6,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

O teor de sílica no concentrado, para o pH 6,0 dos coletores estudados se apresentou na faixa de 15,62 % a 25,73 %, com exceção do coletor flotim FS-1 que apresentou um teor de sílica de 36,47 % e do coletor óleo de pinho que apresentou um teor de 47,65 %. O teor de ferro no rejeito para o pH 6,0, se apresentou na faixa de 2,25 % a 4,23 %.

A figura 5.26 apresenta os resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 6,0, na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

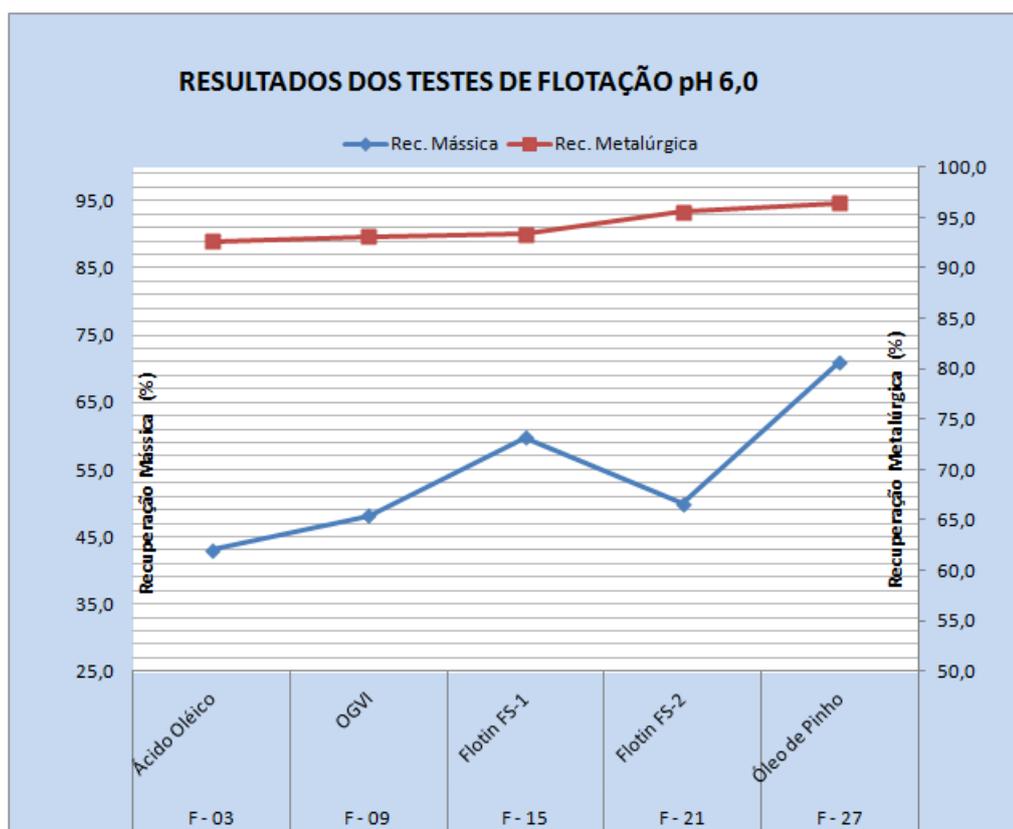


Figura 5.26 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 6,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

A recuperação mássica apresentou - se na faixa de 43,00 % a 49,88 %, com exceção do coletor flotín FS-1 que apresentou uma recuperação mássica de 59,73 % e o coletor óleo de pinho que apresentou uma recuperação mássica de 71,05 %. A recuperação metalúrgica apresentou-se na faixa de 92,61 % a 96,47 %, em pH 6,0 para os coletores estudados.

A figura 5.27 apresenta os resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 6,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

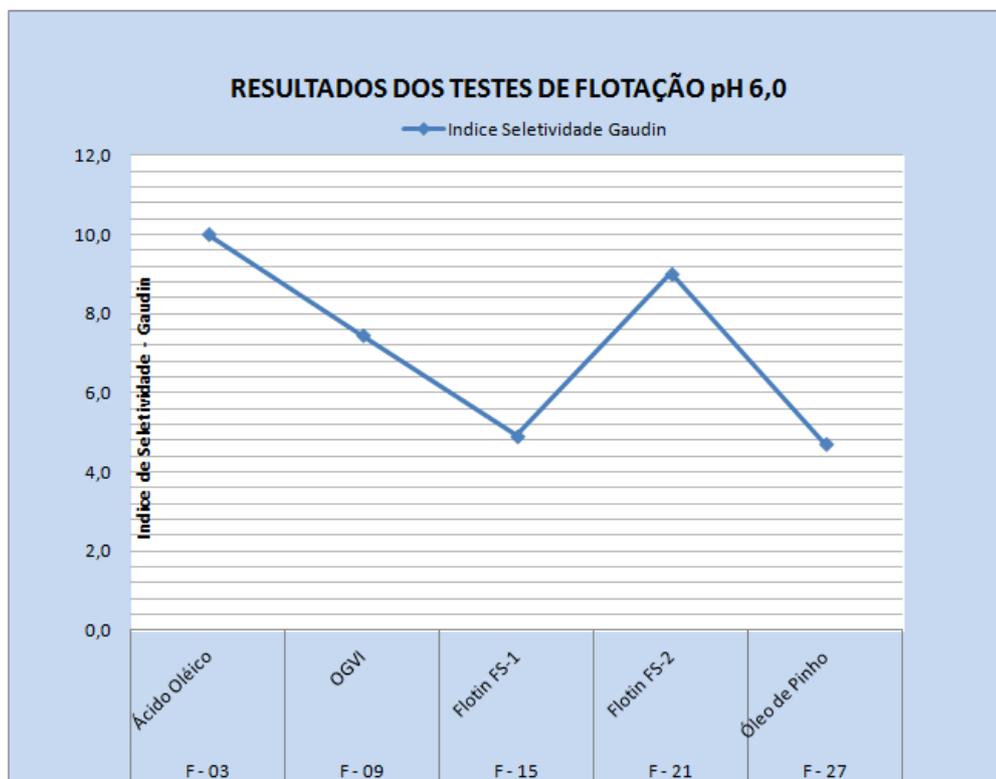


Figura 5.27 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 6,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

O índice de seletividade GAUDIN se apresentou na faixa de 7,46 a 10,01 em pH 6,0 para os coletores ácido oléico, OGVI óleo graxo vegetal industrial e flotín FS-2. Para o coletor flotín FS-1, o índice de seletividade foi de 4,92 e para o coletor óleo de pinho o índice de seletividade foi de 4,70.

5.4.9. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 7,0, variando os tipos de reagentes coletores

A tabela 5.12 apresenta os resultados dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

Tabela 5.12 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, variando os tipos de coletores.

Código do Ensaio	Recuperações		IS	Teor		pH	Reagente	
	Mássica	Metalúrgica	Gaudin	SiO ₂ - Conc.	Fe - Rej.		Adm.	Coletor
	(%)	(%)	Adm.	(%)	(%)			
F - 04	42,21	92,66	11,43	12,49	3,32	pH 7,0	Ácido Oléico	Nenhum
F - 10	43,99	92,45	9,00	18,09	3,48		OGVI	
F - 16	54,36	94,11	6,24	32,38	3,32		Flotin FS-1	
F - 22	47,49	94,29	8,72	22,87	2,79		Flotin FS-2	
F - 28	80,85	96,45	3,37	51,87	4,78		Óleo de Pinho	

Nos testes de flotação realizados para avaliar a influência dos reagentes coletores em pH 7,0, pode ser observado na tabela 5.12 que o coletor ácido oléico que obteve maior índice de seletividade GAUDIN (11,43) com um teor de sílica no concentrado de 12,49 %, um teor de ferro no rejeito de 3,32 %, uma recuperação mássica de 42,21 % e uma recuperação metalúrgica de 92,66 %. O coletor OGVI óleo graxo vegetal industrial obteve um segundo melhor índice de seletividade GAUDIN (9,00), com um teor de sílica no concentrado de 18,09 %, um teor de ferro no rejeito de 3,48 %, uma recuperação mássica de 43,99 % e uma recuperação metalúrgica de 92,45 %.

A figura 5.28 apresenta os resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

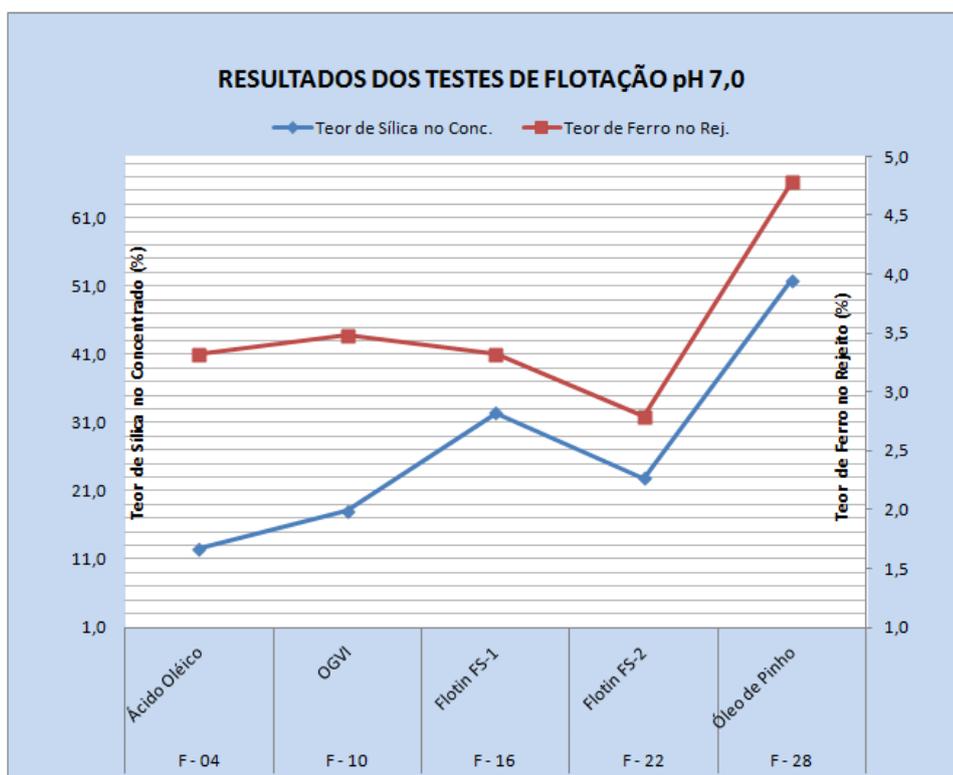


Figura 5.28 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor

O teor de sílica no concentrado, para o pH 7,0, dos coletores estudados se apresentou na faixa de 12,49 % a 22,87 %, com exceção do coletor flotim FS-1 que apresentou um teor de sílica de 32,38 % e do coletor óleo de pinho que apresentou um teor de sílica de 51,87 %. O teor de ferro no rejeito para o pH 7,0 se apresentou na faixa de 2,79 % a 4,78 %.

A figura 5.29 apresenta os resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

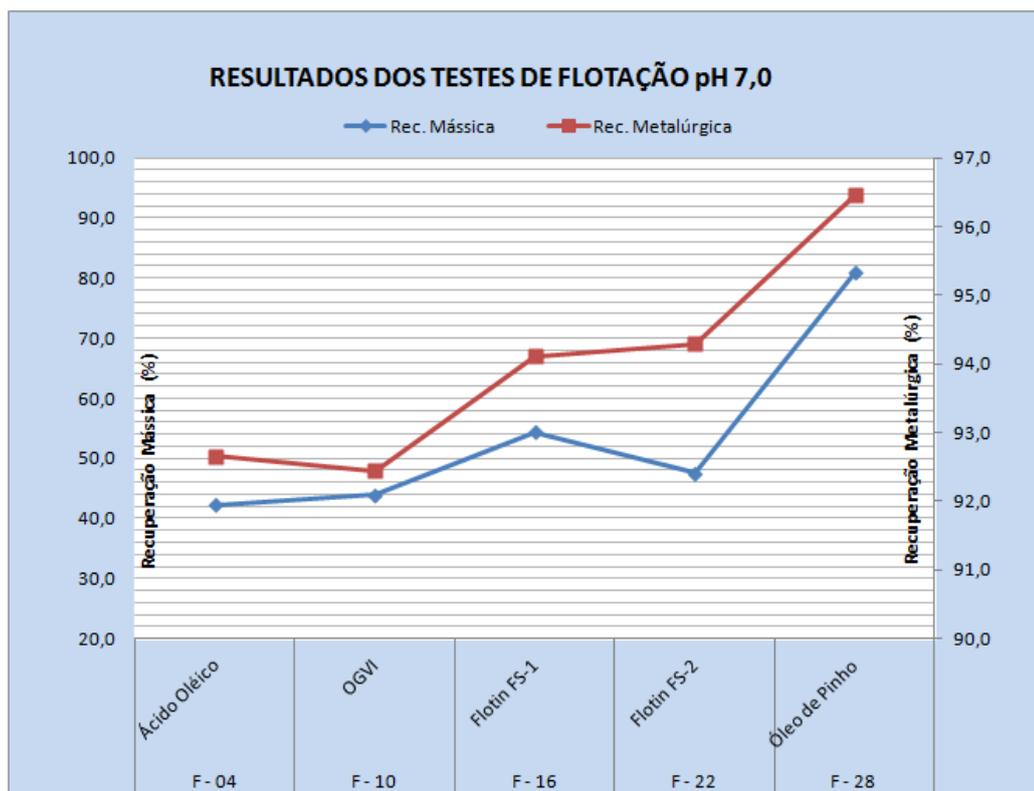


Figura 5.29 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

A recuperação mássica apresentou - se na faixa de 42,21 % a 47,49 %, com exceção do coletor flotin FS-1 que apresentou uma recuperação mássica de 54,36 % e do coletor óleo de pinho que apresentou uma recuperação mássica de 80,85 %. A recuperação metalúrgica apresentou-se na faixa de 92,45 % a 96,45 %, em pH 7,0 para os coletores estudados.

A figura 5.30 apresenta os resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

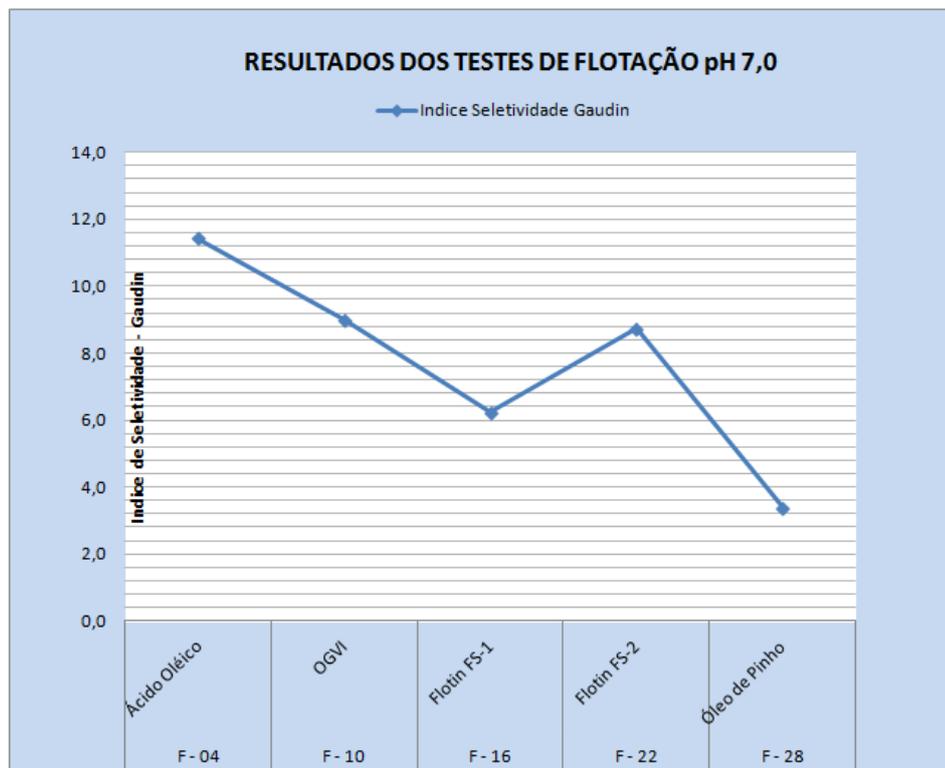


Figura 5.30 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

O índice de seletividade GAUDIN se apresentou na faixa de 8,72 a 11,43, em pH 7,0, para os coletores ácido oléico, OGVI óleo graxo vegetal industrial e flotim FS-2. Para o coletor flotim FS-1, o índice de seletividade foi de 6,24 e para o coletor óleo de pinho o índice de seletividade foi de 3,37.

5.4.10. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 8,0, variando os tipos de reagentes coletores

A tabela 5.13 apresenta os resultados dos testes de flotação em escala de bancada em pH 8,0, na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

Tabela 5.13 – Resultados dos testes de flotação em pH 8,0, variando os tipos de coletores.

Código do Ensaio	Recuperações		IS	Teor		pH	Reagente	
	Mássica	Metalúrgica	Gaudin	SiO ₂ - Conc.	Fe - Rej.		Adm.	Coletor
	(%)	(%)	Adm.	(%)	(%)			
F - 05	44,13	93,84	10,37	16,99	2,85	pH 8,0	Ácido Oléico	Nenhum
F - 11	47,19	91,22	6,37	26,67	4,12		OGVI	
F - 17	79,60	96,74	3,64	53,12	4,09		Flotin FS-1	
F - 23	62,81	92,06	3,82	42,52	5,48		Flotin FS-2	
F - 29	3,15	3,33	1,05	57,19	25,65		Óleo de Pinho	

Nos testes de flotação realizados para avaliar a influência dos reagentes coletores em pH 8,0, pode ser observado na tabela 5.13 que o coletor ácido oléico obteve o maior índice de seletividade GAUDIN (10,37), com um teor de sílica no concentrado de 16,99 %, um teor de ferro no rejeito de 2,85 %, uma recuperação mássica de 44,13 % e uma recuperação metalúrgica de 93,84 %. O coletor OGVI óleo graxo vegetal industrial obteve o segundo melhor índice de seletividade GAUDIN (6,37) com um teor de sílica no concentrado de 26,67 %, um teor de ferro no rejeito de 4,12 %, uma recuperação mássica de 47,19 % e uma recuperação metalúrgica de 91,22 %.

A figura 5.31 apresenta os resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 8,0, na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

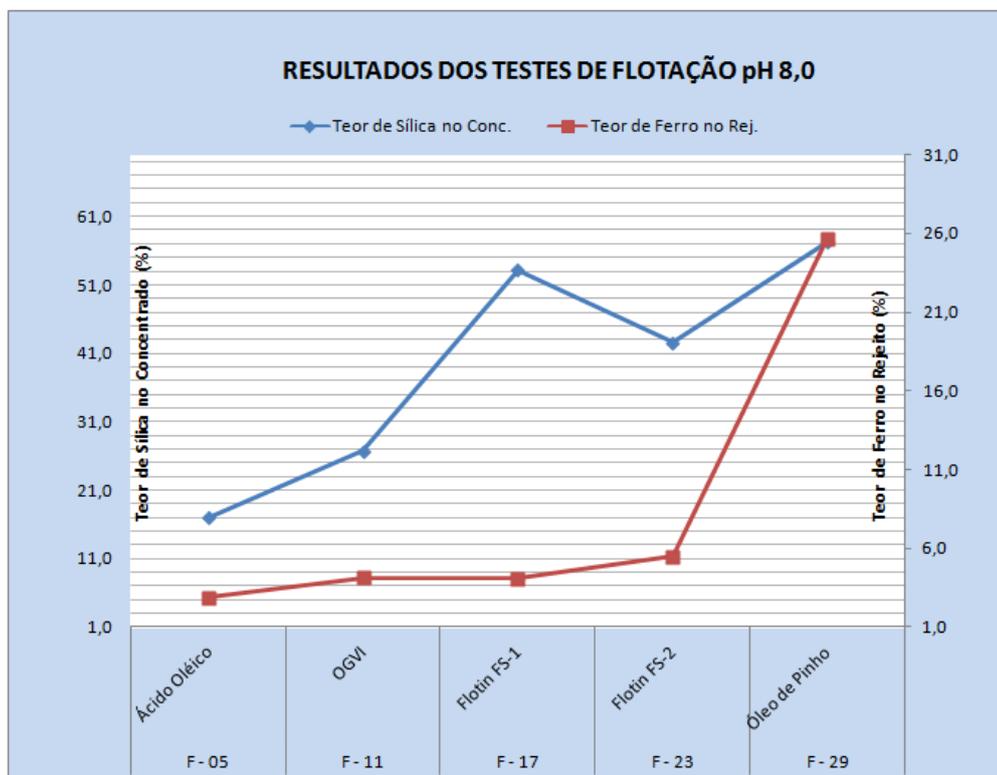


Figura 5.31 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 8,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

O teor de sílica no concentrado, para o pH 8,0, dos coletores estudados se apresentou na faixa de 16,99 % a 42,52 %, com exceção do coletor flotín FS-1 que apresentou um teor de sílica de 53,12 % e do coletor óleo de pinho que apresentou um teor de sílica de 57,19 %. O teor de ferro no rejeito para o pH 8,0 se apresentou na faixa de 2,85 % a 5,48 %, com exceção do coletor óleo de pinho que apresentou um teor de ferro no rejeito de 25,65 %.

A figura 5.32 apresenta os resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 8,0, na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

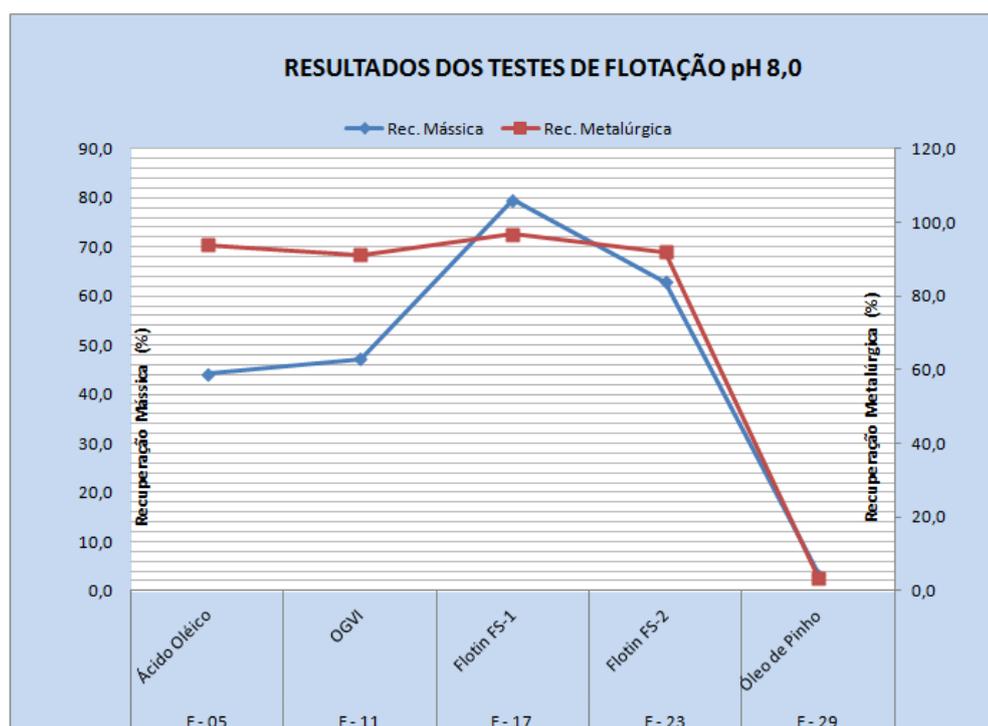


Figura 5.32 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 8,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

A recuperação mássica apresentou - se na faixa de 44,13 % a 62,81 %, com exceção do coletor flotim FS-1 que apresentou uma recuperação mássica de 79,60 % e o coletor óleo de pinho que apresentou uma recuperação mássica de 3,15 %. A recuperação metalúrgica apresentou-se na faixa de 91,22 % a 96,74 % em pH 8,0, para os coletores estudados, com exceção do coletor óleo de pinho que apresentou uma recuperação metalúrgica de 3,33 %.

A figura 5.33 apresenta os resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 8,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

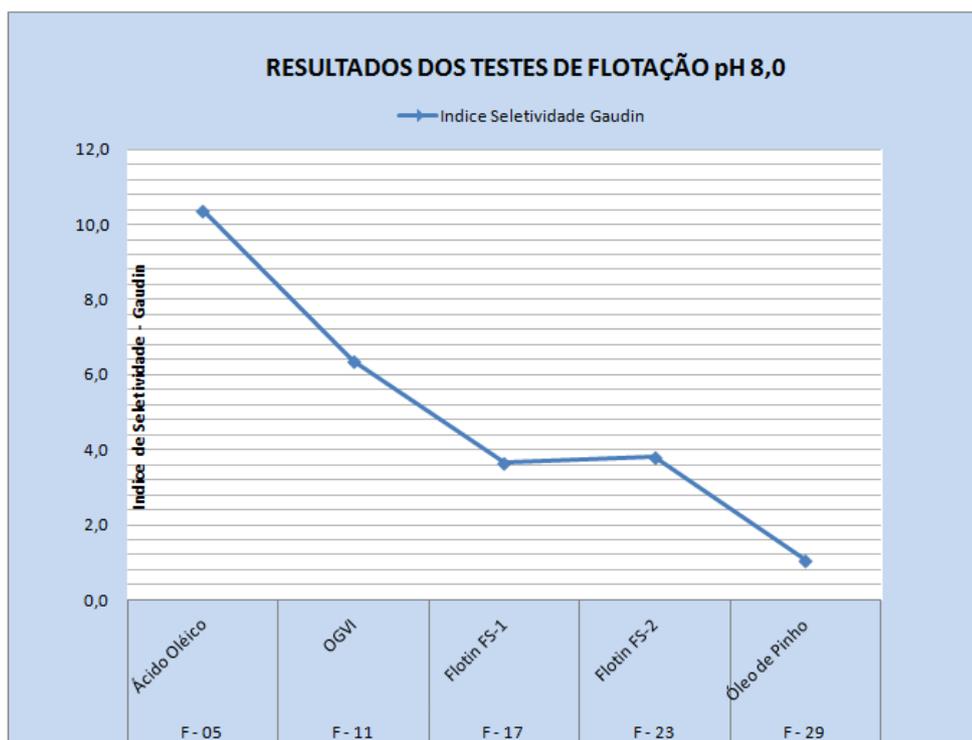


Figura 5.33 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 8,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

O índice de seletividade GAUDIN se apresentou na faixa de 3,64 a 10,37 em pH 8,0 para os coletores estudados, com exceção do coletor óleo de pinho que apresentou um índice de seletividade de 1,05.

5.4.11. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 10,0, variando os tipos de reagentes coletores

A tabela 5.14 apresenta os resultados dos testes de flotação em escala de bancada em pH 10,0, na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

Tabela 5.14 – Resultados dos testes de flotação em pH 10,0, variando os tipos de coletores.

Código do Ensaio	Recuperações		IS	Teor		pH	Reagente	
	Mássica	Metalúrgica	Gaudin	SiO ₂ - Conc.	Fe - Rej.		Adm.	Coletor
	(%)	(%)	Adm.	(%)	(%)			
F - 06	95,54	98,22	1,87	59,96	10,26	pH 10,0	Ácido Oléico	Nenhum
F - 12	96,26	98,08	1,59	59,52	13,02		OGVI	
F - 18	93,51	98,37	2,49	59,07	6,44		Flotin FS-1	
F - 24	83,81	94,21	2,15	56,99	9,14		Flotin FS-2	

Nos testes de flotação realizados para avaliar a influência dos reagentes coletores em pH 10,0, pode ser observado na tabela 5.14, que o coletor flotin FS-1 que obteve maior índice de seletividade GAUDIN (2,49) com um teor de sílica no concentrado de 59,07 %, um teor de ferro no rejeito de 6,44%, uma recuperação mássica de 93,51 % e uma recuperação metalúrgica de 98,37 %. O coletor flotin FS-2 obteve um segundo melhor índice de seletividade GAUDIN (2,15) com um teor de sílica no concentrado de 56,99 %, um teor de ferro no rejeito de 9,14 %, uma recuperação mássica de 83,81 % e uma recuperação metalúrgica de 94,21 %.

A figura 5.34 apresenta os resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 10,0, na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

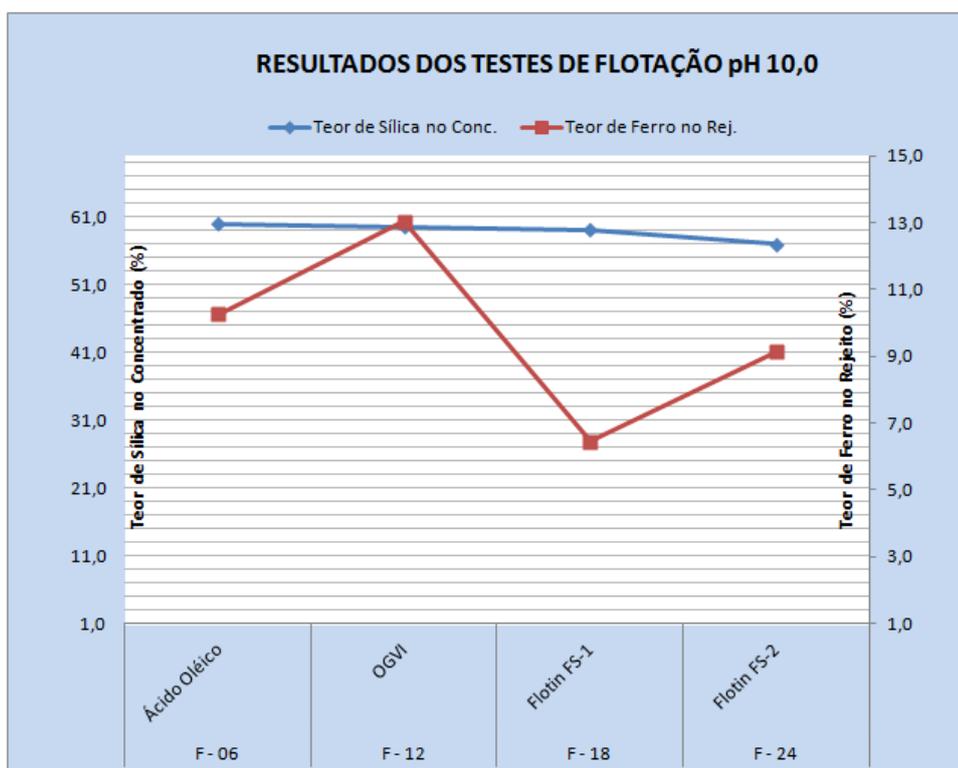


Figura 5.34 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 10,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

O teor de sílica no concentrado, para o pH 10,0, dos coletores estudados se apresentou na faixa de 56,99 % a 59,96 %. O teor de ferro no rejeito para o pH 10,0 se apresentou na faixa de 6,44 % a 13,02 %.

A figura 5.35 apresenta os resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 10,0, na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

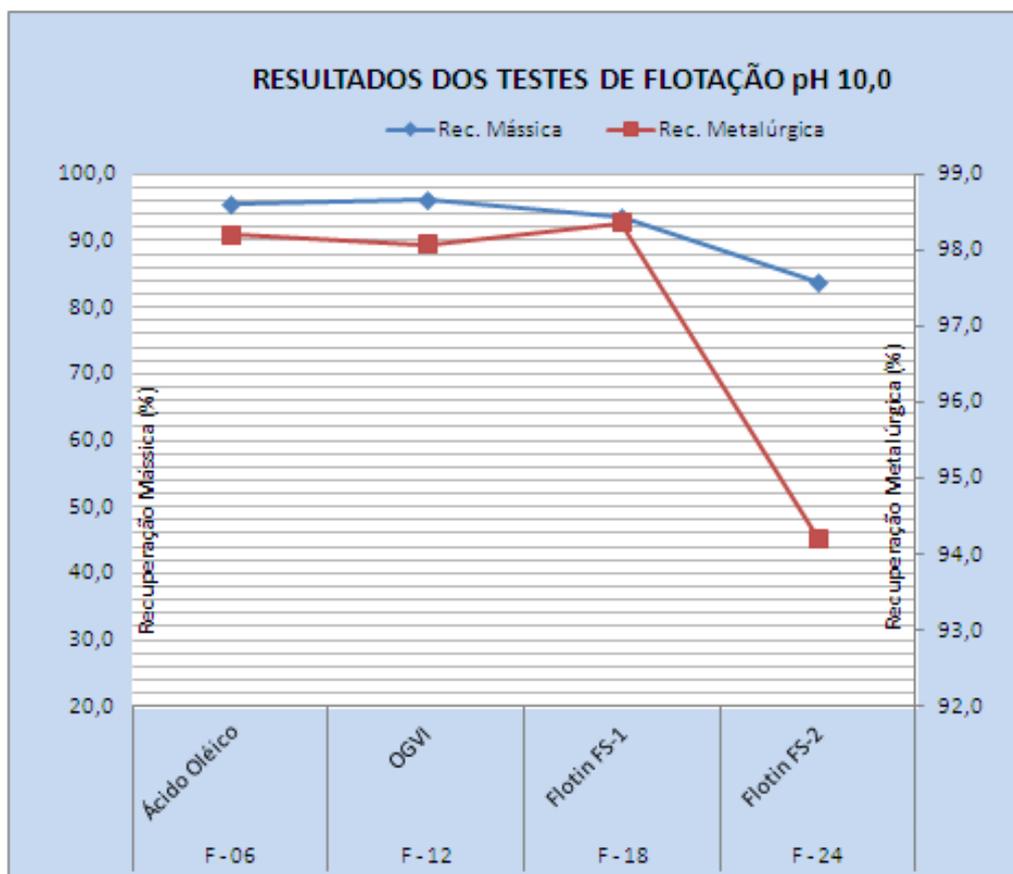


Figura 5.35 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 10,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

A recuperação mássica apresentou - se na faixa de 83,81 % a 96,26 e a recuperação metalúrgica apresentou-se na faixa de 94,21 % a 98,37 %, em pH 10,0, para os coletores estudados.

A figura 5.36 apresenta os resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 10,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

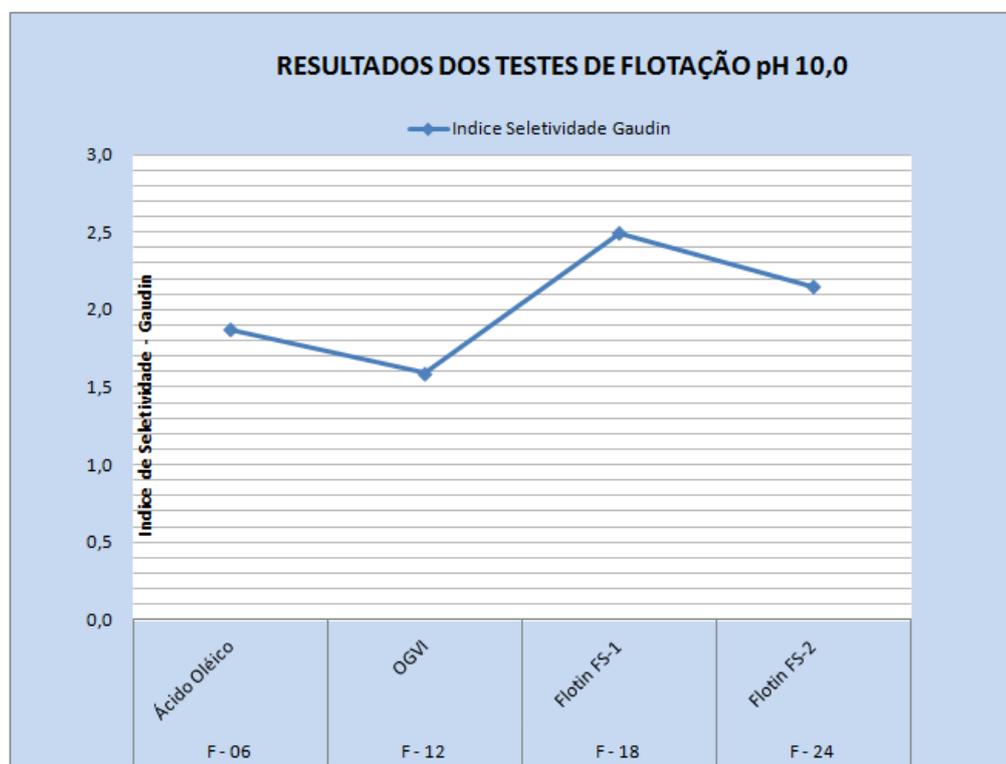


Figura 5.36 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 10,0 na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tipo de coletor.

O índice de seletividade GAUDIN se apresentou na faixa de 1,87 a 2,49, em pH 10,0, para os coletores estudados.

Após análise dos resultados da primeira fase deste trabalho, verificou-se que o coletor ácido oléico obteve os melhores resultados de índice de seletividade, teor de sílica no concentrado, teor de ferro no rejeito e o melhor pH foi o pH 7,0.

5.4.12. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 7,0, utilizando o coletor ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, variando a rotação

A tabela 5.15 apresenta os resultados dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da rotação, foram avaliadas as rotações de 900 rpm, 1800 rpm e 2500 rpm.

Tabela 5.15 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, variando a rotação.

Código do Ensaio	Recuperações		IS	Teor		pH	Rotação
	Mássica (%)	Metalúrgica (%)	Gaudin Adm.	SiO ₂ - Conc. (%)	Fe - Rej. (%)		
F - 04	42,21	92,66	11,43	12,49	3,32	7,0	900 rpm
F - 53	84,74	93,32	1,90	56,59	11,18		1800 rpm
F - 54	51,69	73,81	2,16	43,92	14,01		2500 rpm

Nos testes de flotação realizados para avaliar a influência da rotação no sistema de flotação, em pH 7,0, pode ser observado na tabela 5.15 que a rotação de 900 rpm foi a que obteve maior índice de seletividade GAUDIN (11,43), com um teor de sílica no concentrado de 12,49 %, um teor de ferro no rejeito de 3,32 %, uma recuperação mássica de 42,21 % e uma recuperação metalúrgica de 92,66 %.

A figura 5.37 apresenta os resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da rotação.

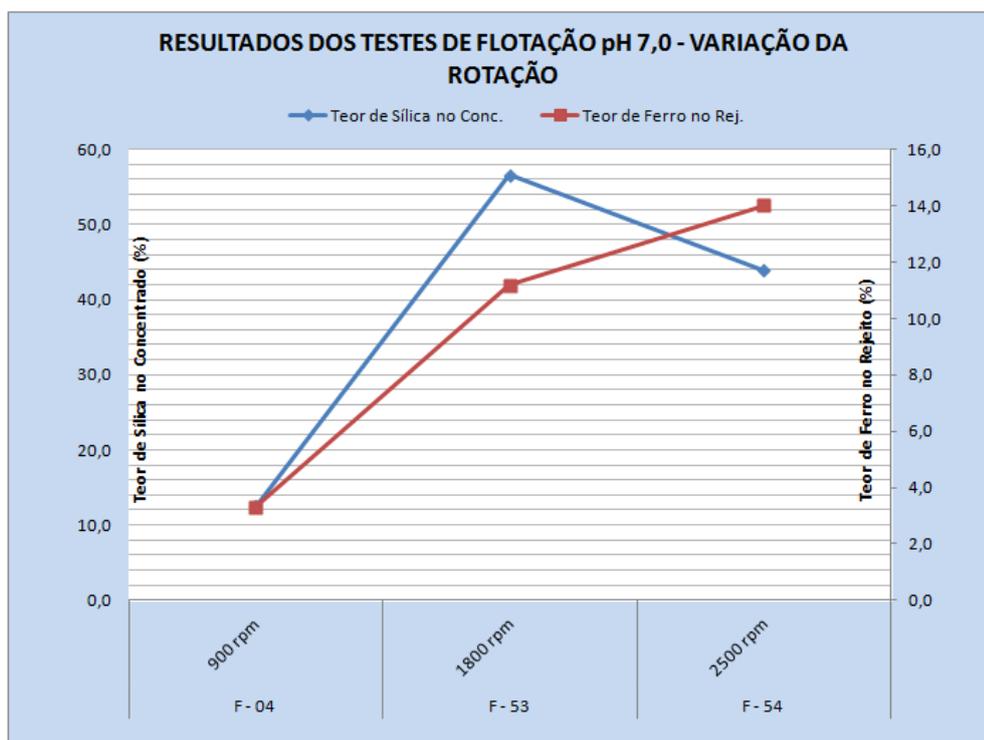


Figura 5.37 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da rotação.

O teor de ferro no rejeito se apresentou na faixa de 3,32 % a 14,01 % e o teor de sílica no concentrado se apresentou na faixa de 12,49 % a 56,59 %.

A figura 5.38 apresenta os resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da rotação.

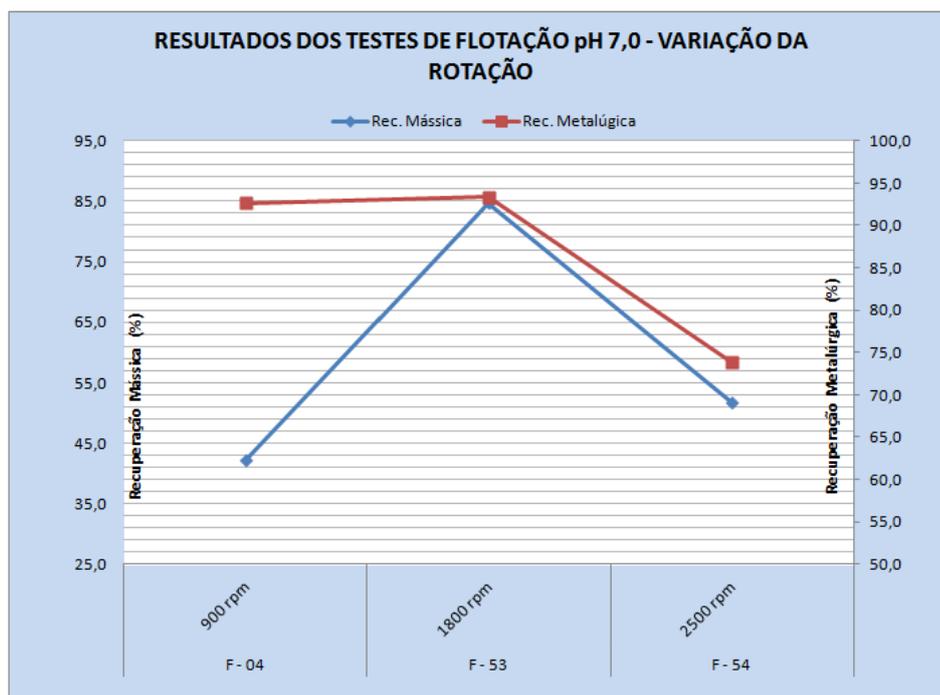


Figura 5.38 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0 utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da rotação.

A recuperação mássica se apresentou na faixa de 42,21 % a 84,74 % e a recuperação metalúrgica se apresentou na faixa de 73,81 % a 93,32 %.

A figura 5.39 apresenta os resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da rotação.

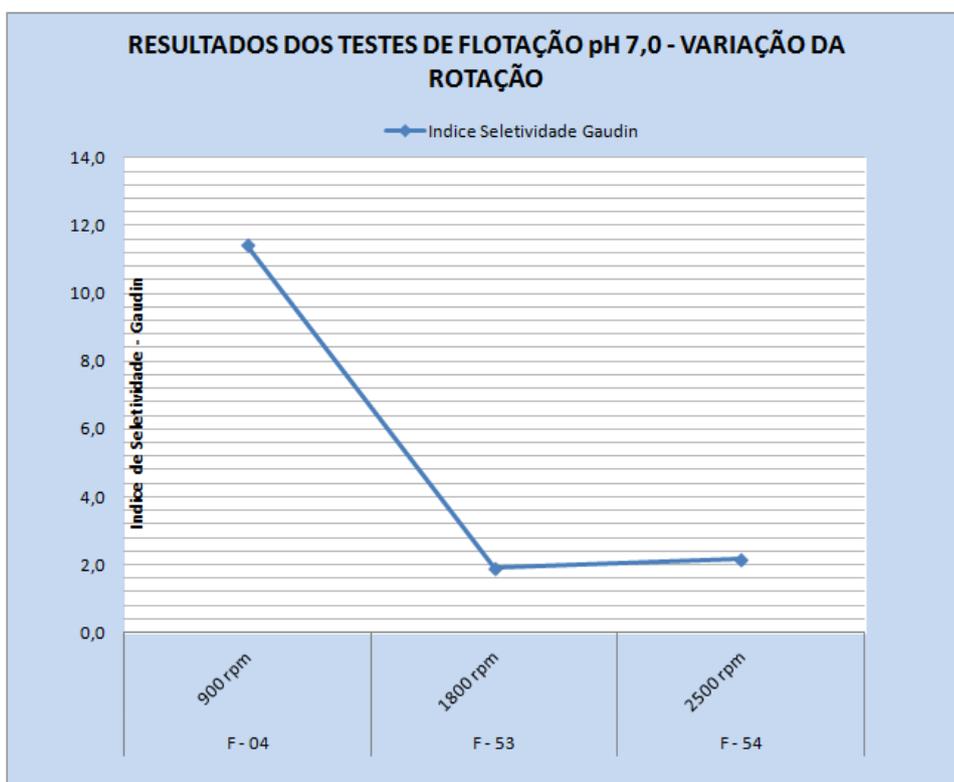


Figura 5.39 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da rotação.

O índice de seletividade GAUDIN se apresentou na faixa de 1,90 a 11,43.

Após esta etapa de definição da rotação, definimos em função das análises dos dados que a melhor rotação para concentrar esta amostra foi de 900 rpm. O objetivo desta etapa foi definir uma rotação para obter o melhor índice de seletividade, um rejeito com baixo teor em ferro para ser descartado e um concentrado com o menor teor de sílica assim como menor percentual em massa para passar pelas etapas de limpeza.

5.4.13. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 7,0, utilizando o coletor ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, variando a % de sólidos no condicionamento

A tabela 5.16 apresenta os resultados dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da % de sólidos no condicionamento, sendo avaliada as % de sólidos de 43,0 %, 50,0 % e 55,0 %.

Tabela 5.16 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, variando a % de sólidos no condicionamento dos testes de flotação.

Código do Ensaio	Recuperações		IS	Teor		pH Adm.	% de Sólidos (%)
	Mássica	Metalúrgica	Gaudin	SiO ₂ - Conc.	Fe - Rej.		
	(%)	(%)	Adm.	(%)	(%)		
F - 51	42,69	93,37	11,31	14,04	2,98	7,0	43,0 % de sólidos
F - 04	42,21	92,66	11,43	12,49	3,32		50,0 % de sólidos
F - 52	46,67	93,88	8,80	21,52	2,97		55,0 % de sólidos

Nos testes de flotação realizados para avaliar a influência da porcentagem de sólidos no condicionamento do sistema de flotação, em pH 7,0, pode ser observado na tabela 5.16 que a porcentagem de sólidos de 50,0 %, no condicionamento dos testes de flotação, foi a que obteve maior índice de seletividade GAUDIN (11,43) com um teor de sílica no concentrado de 12,49 %, um teor de ferro no rejeito de 3,32 %, uma recuperação mássica de 42,21 % e uma recuperação metalúrgica de 92,66 %.

A figura 5.40 apresenta os resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da % de sólidos.

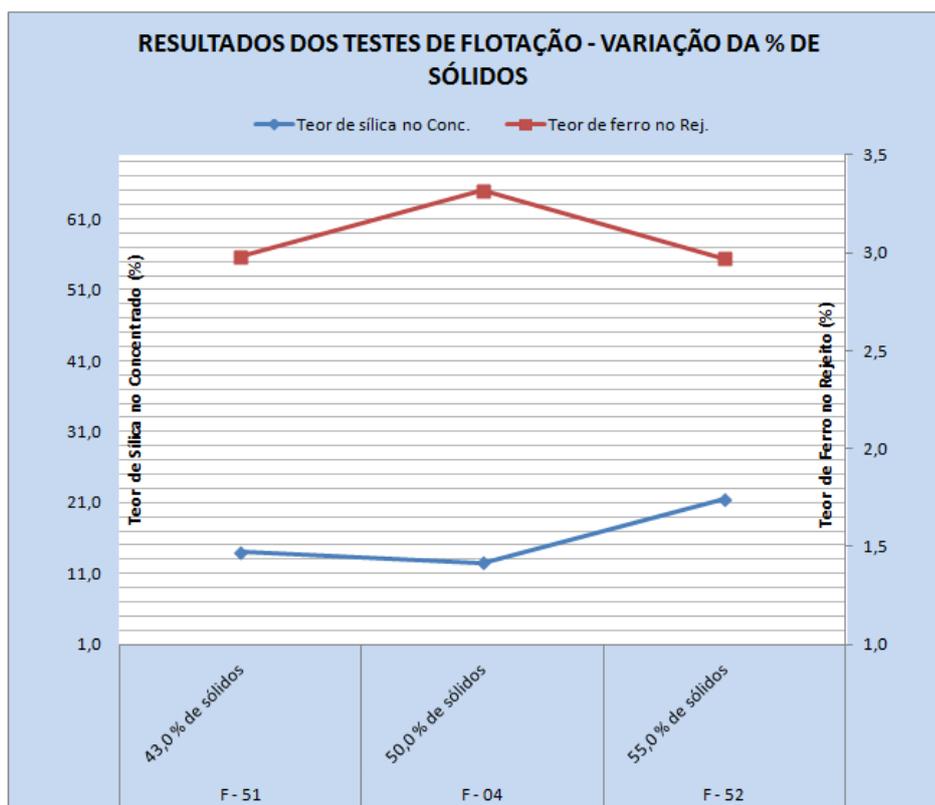


Figura 5.40 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da % de sólidos.

O teor de sílica no concentrado se apresentou na faixa de 12,49 % a 21,52 % e o teor de ferro no rejeito se apresentou na faixa de 2,98 % a 3,32 %.

A figura 5.41 apresenta os resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da % de sólidos.

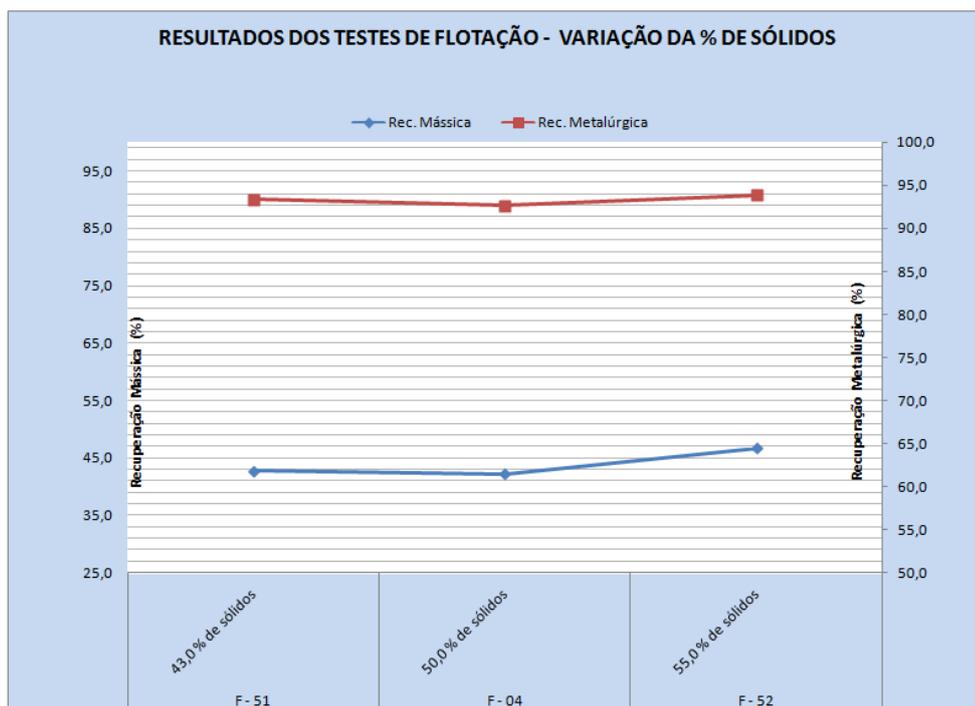


Figura 5.41 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0 utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da % de sólidos.

A recuperação mássica se apresentou na faixa de 42,21 % a 46,67 % e a recuperação metalúrgica se apresentou na faixa de 92,66 % a 93,88 %.

A figura 5.42 apresenta os resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da % de sólidos.

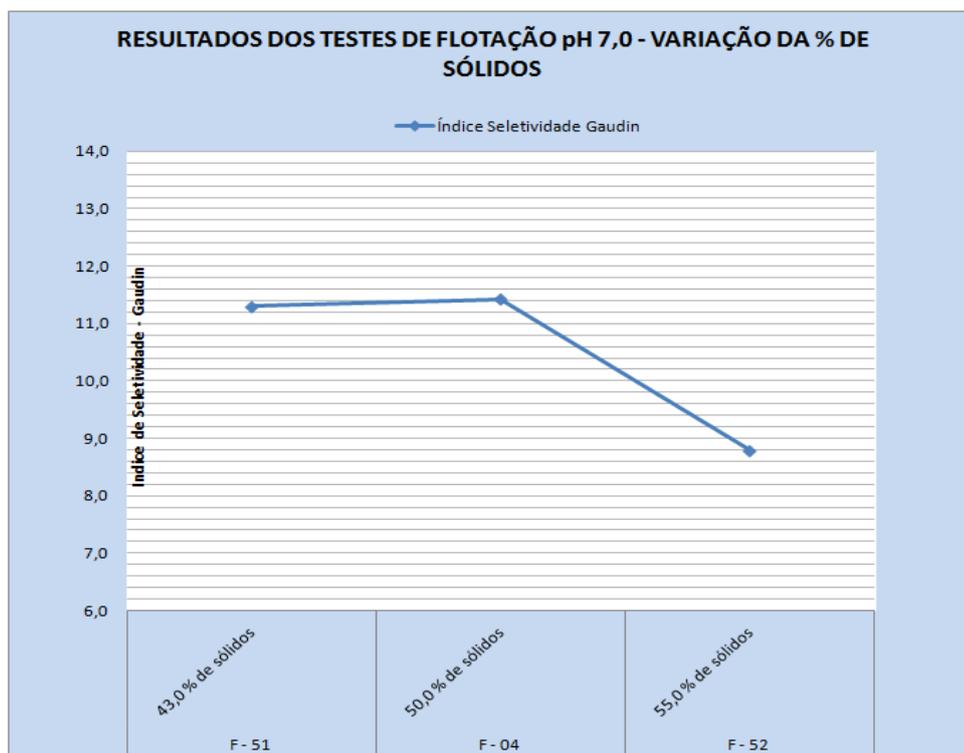


Figura 5.42 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da rotação.

O índice de seletividade GAUDIN se apresentou na faixa de 8,80 a 11,43.

Após esta etapa de definição da porcentagem de sólidos no condicionamento, definimos em função da análise dos dados que a melhor porcentagem de sólidos no condicionamento para concentrar esta amostra foi de 50,0 % de sólidos. O objetivo desta etapa foi definir uma porcentagem de sólidos para obter o melhor índice de seletividade, um rejeito com baixo teor em ferro que possa ser descartado e um concentrado com o menor teor de sílica e menor percentual em massa para passar pelas etapas de limpeza.

5.4.14. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 7,0, utilizando o coletor ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, variando o tempo de condicionamento

A tabela 5.17 apresenta os resultados dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação do tempo de condicionamento, sendo avaliados os tempos de 3,0 minutos, 10,0 minutos e 20,0 minutos.

Tabela 5.17 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, variando o tempo de condicionamento nos testes de flotação.

Código do Ensaio	Recuperações		IS	Teor		pH	Condicionamento
	Mássica	Metalúrgica	Gaudin	SiO ₂ - Conc.	Fe - Rej.		
	(%)	(%)	Adm.	(%)	(%)	Adm.	Minutos
F - 04	42,21	92,66	11,43	12,49	3,32	pH 7,0	3,0 min
F - 55	42,30	91,73	9,75	14,93	3,71		10,0 min
F - 56	43,54	91,03	8,09	18,78	4,08		20,0 min

Nos testes de flotação realizados para avaliar a influência do tempo de condicionamento do sistema de flotação, em pH 7,0, pode ser observado na tabela 5.17 que o tempo de 3,0 minutos no condicionamento do coletor nos testes de flotação foi a que obteve maior índice de seletividade GAUDIN (11,43), com um teor de sílica no concentrado de 12,49 %, um teor de ferro no rejeito de 3,32 %, uma recuperação mássica de 42,21 % e uma recuperação metalúrgica de 92,66 %.

A figura 5.43 apresenta os resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tempo de condicionamento do coletor .

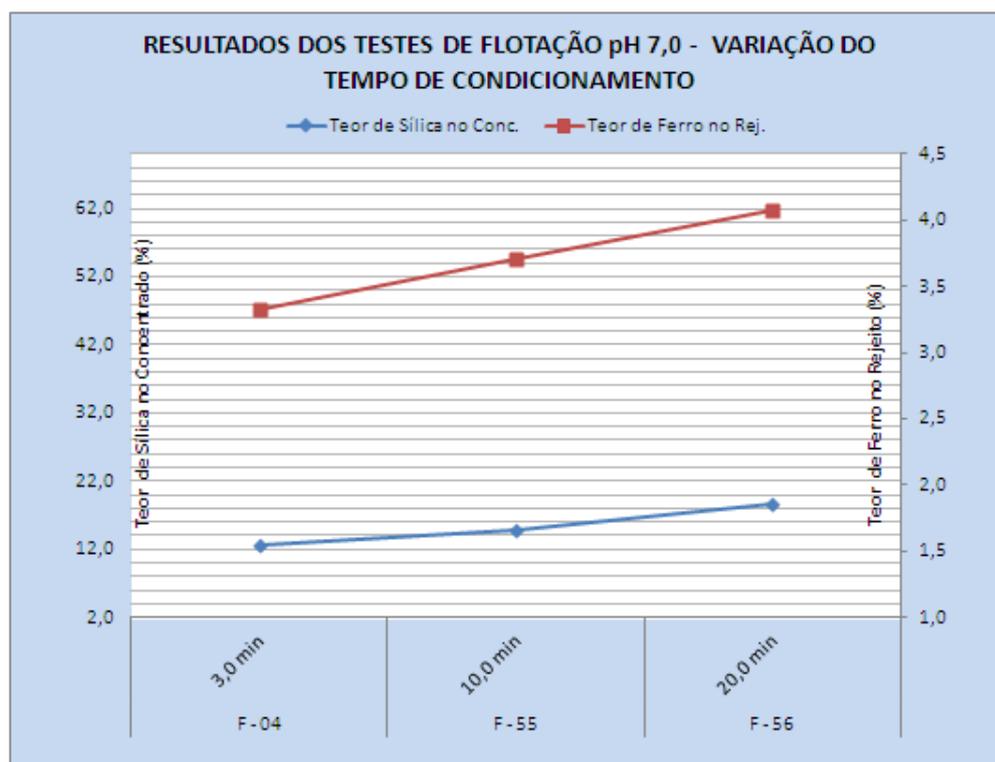


Figura 5.43 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tempo de condicionamento.

O teor de sílica no concentrado se apresentou na faixa de 12,49 % a 18,78 % e o teor de ferro no rejeito se apresentou na faixa de 3,32 % a 4,08 %.

A figura 5.44 apresenta os resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tempo de condicionamento.

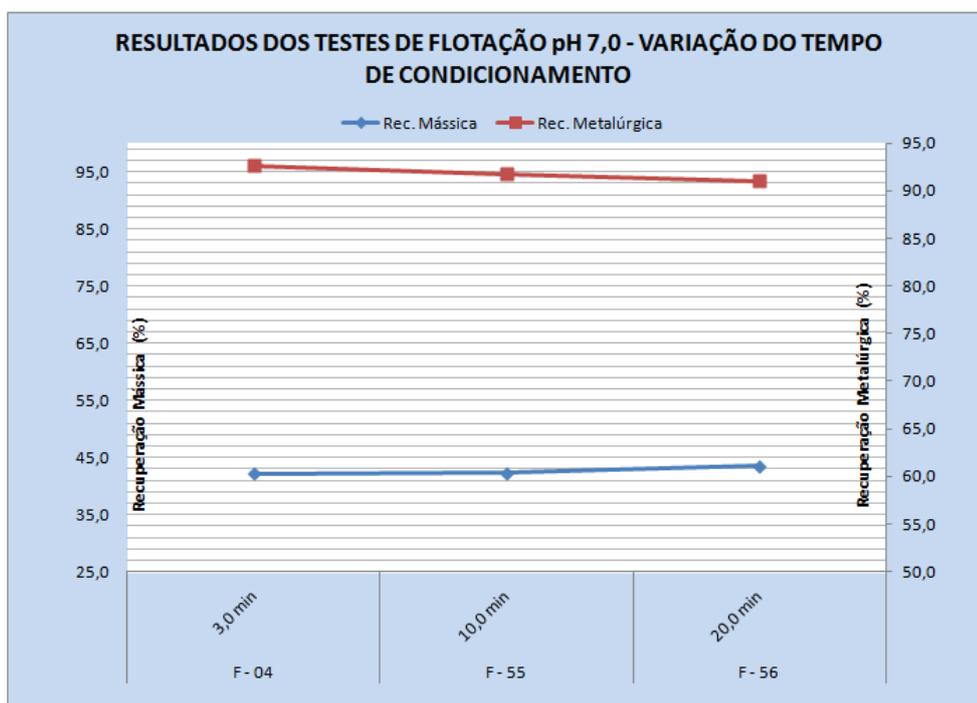


Figura 5.44 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0 utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tempo de condicionamento.

A recuperação mássica se apresentou na faixa de 42,21 % a 43,54 % e a recuperação metalúrgica se apresentou na faixa de 91,03 % a 92,66 %.

A figura 5.45 apresenta os resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência do tempo de condicionamento.

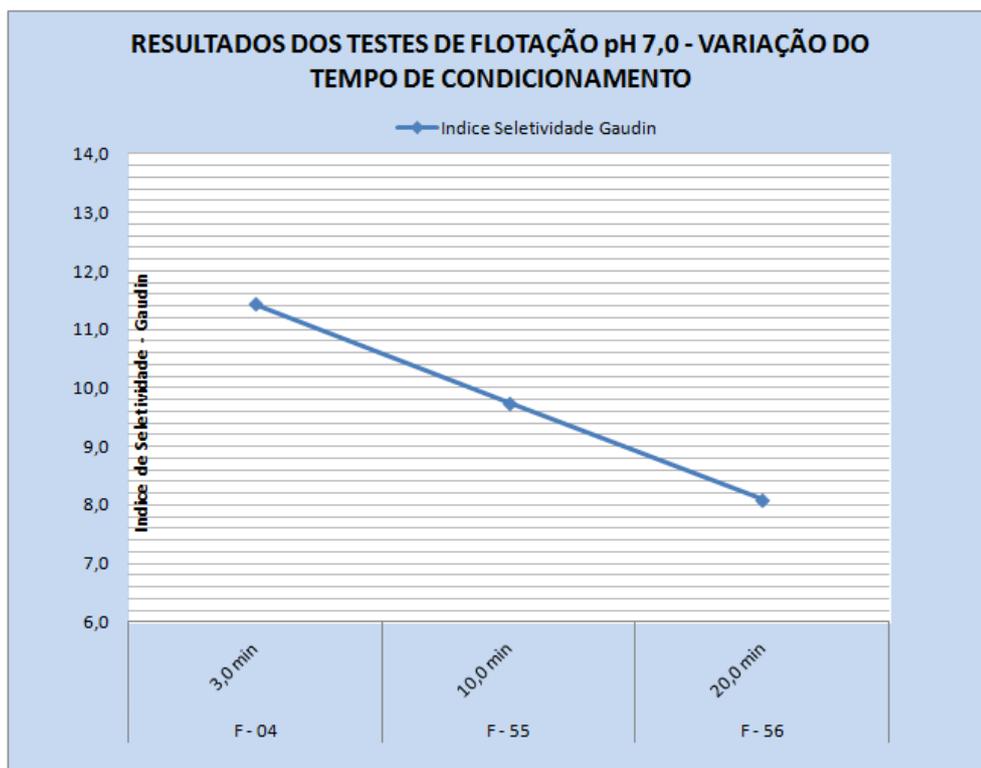


Figura 5.45 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação do tempo de condicionamento.

O índice de seletividade GAUDIN se apresentou na faixa de 8,09 a 11,43.

Após esta etapa de definição do tempo de condicionamento do coletor, definimos em função da análise dos dados que o melhor tempo de condicionamento para concentrar esta amostra foi de 3,0 minutos. O objetivo desta etapa era definir um tempo de condicionamento para obter o melhor índice de seletividade, um rejeito com baixo teor em ferro que possa ser descartado e um concentrado com o menor teor de sílica e menor percentual em massa para passar pelas etapas de limpeza.

5.4.15. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 7,0, utilizando o coletor ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação} , variando a dosagem do reagente espumante

A tabela 5.18 apresenta os resultados dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da dosagem do reagente espumante flotanol D 15, sendo avaliadas as dosagens de 0,0 g/t, 40,0 g/t e 80,0 g/t de sólidos na alimentação.

Tabela 5.18 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, variando a dosagem do reagente espumante flotanol D 25 nos testes de flotação.

Código do Ensaio	Recuperações		IS	Teor		pH Adm.	Espumante g/t
	Mássica	Metalúrgica	Gaudin	SiO ₂ - Conc.	Fe - Rej.		
	(%)	(%)	Adm.	(%)	(%)		
F - 04	42,21	92,66	11,43	12,49	3,32	7,0	0 g/t
F - 49	42,36	91,73	9,29	16,41	3,67		40 g/t
F - 50	53,17	94,90	7,18	30,32	2,78		80 g/t

Nos testes de flotação realizados para avaliar a influência da dosagem do reagente espumante flotanol D 25 no sistema de flotação, em pH 7,0, pode ser observado na tabela 5.18 que a dosagem de 0,0 g/t do reagente espumante flotanol D 25 foi a que obteve maior índice de seletividade GAUDIN (11,43), com um teor de sílica no concentrado de 12,49 %, um teor de ferro no rejeito de 3,32 %, uma recuperação mássica de 42,21 % e uma recuperação metalúrgica de 92,66 %.

A figura 5.46 apresenta os resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da dosagem do reagente espumante flotanol D 25 .

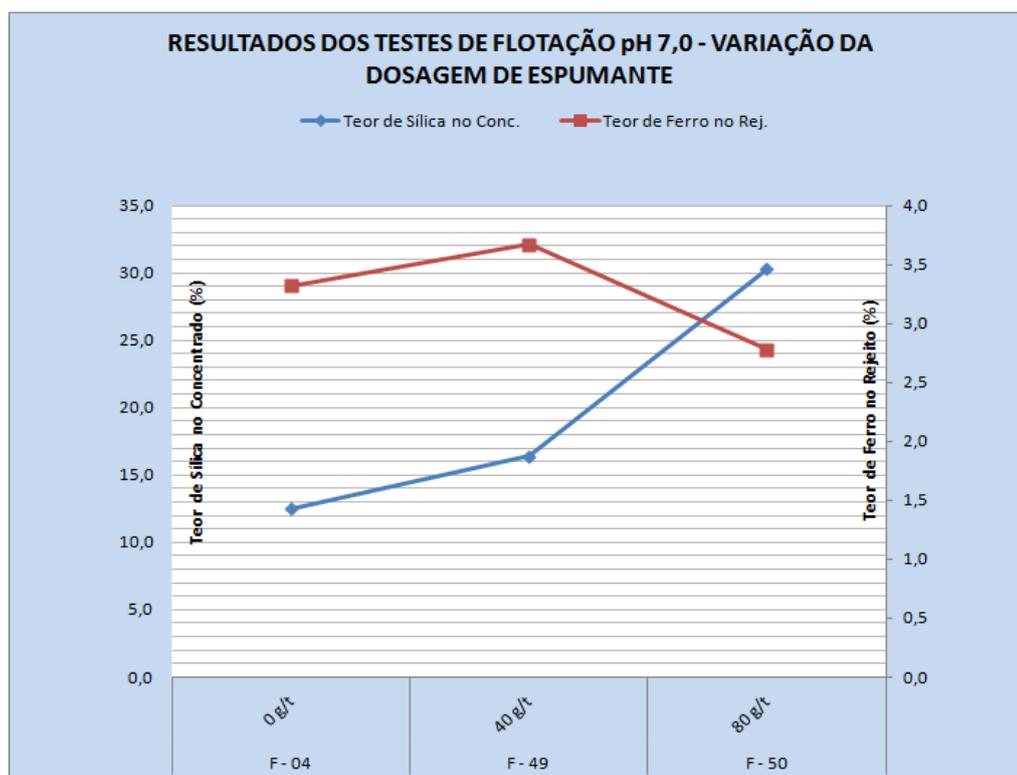


Figura 5.46 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da dosagem do reagente espumante.

O teor de sílica no concentrado se apresentou na faixa de 12,49 % a 30,32 % e o teor de ferro no rejeito se apresentou na faixa de 2,78 % a 3,67 %.

A figura 5.47 apresenta os resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da dosagem do reagente espumante.

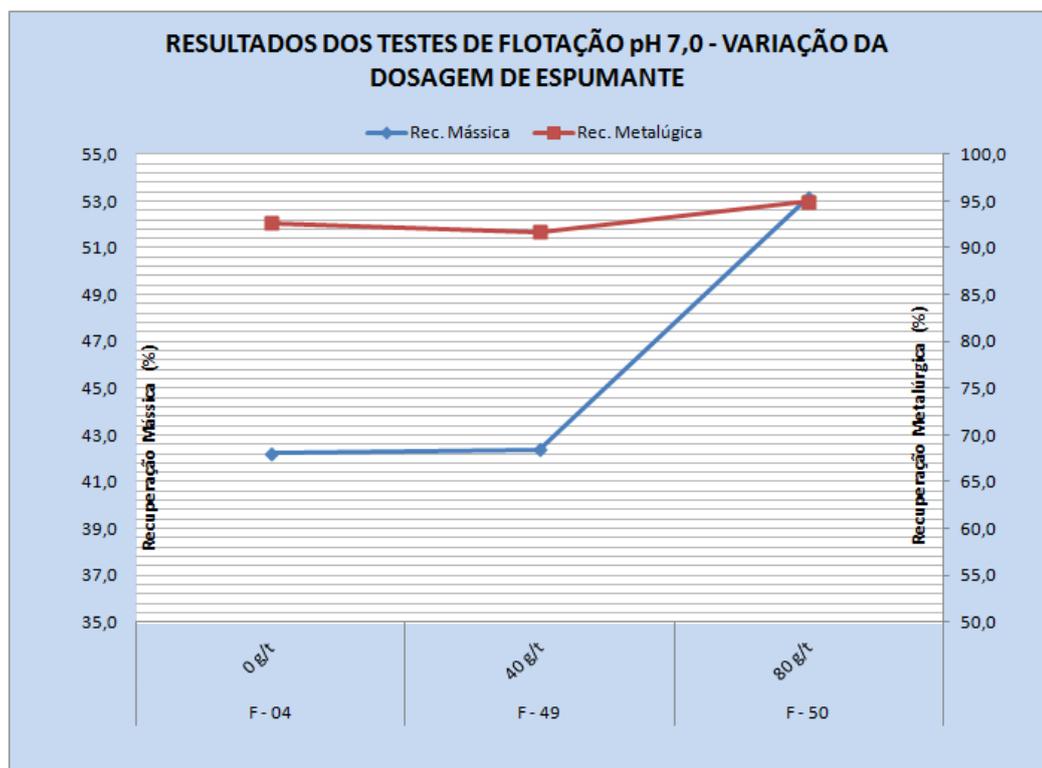


Figura 5.47 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0 utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da dosagem do reagente espumante.

A recuperação mássica se apresentou na faixa de 42,21 % a 53,17 % e a recuperação metalúrgica se apresentou na faixa de 91,73 % a 94,90 %.

A figura 5.48 apresenta os resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da dosagem do reagente espumante.

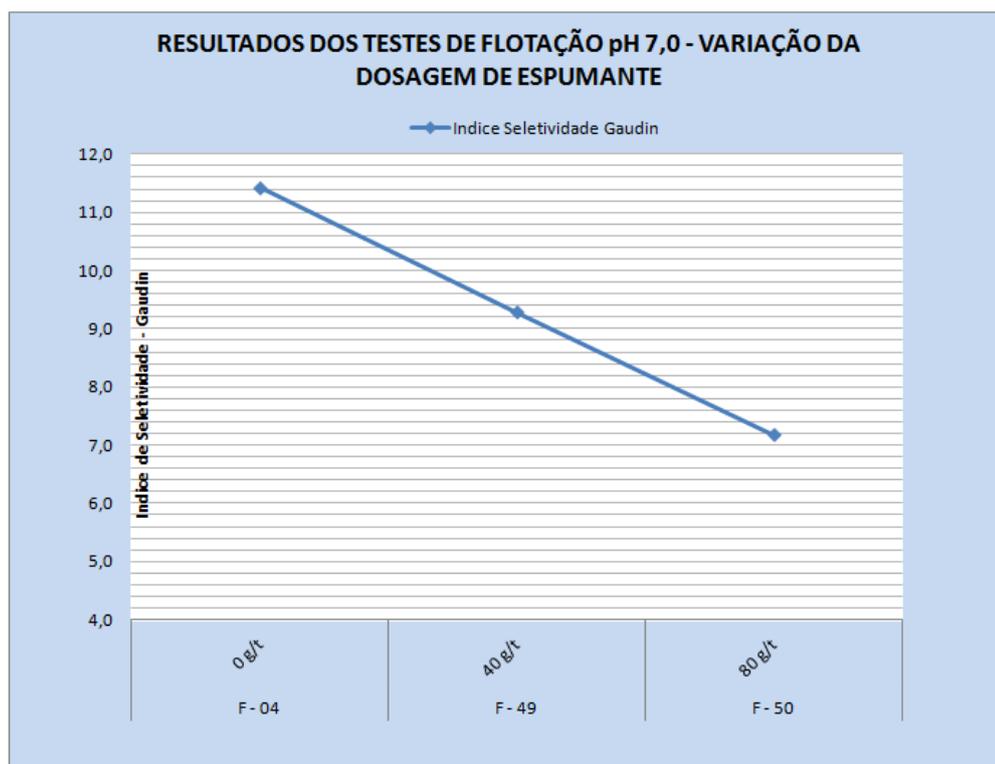


Figura 5.48 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da dosagem do reagente espumante.

O índice de seletividade GAUDIN se apresentou na faixa de 7,18 a 11,43.

Após esta etapa de definição da dosagem do reagente espumante flotanol D 25, definimos em função das análises dos dados que a melhor dosagem do reagente espumante flotanol D 25 foi de 0,0 g/t de alimentação de sólidos. Uma vez que o objetivo desta etapa era definir uma dosagem do reagente espumante para obter o melhor índice de seletividade, um rejeito com baixo teor em ferro que possa ser descartado e um concentrado com o menor teor de sílica e menor percentual em massa para passar pelas etapas de limpeza.

5.4.16. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 7,0, utilizando o coletor ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, variando a dosagem do reagente dispersante

A tabela 5.19 apresenta os resultados dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da dosagem do reagente dispersante hexametáfosfato de sódio, sendo avaliada as dosagens de 0,0 g/t, 40,0 g/t e 80,0 g/t de sólidos na alimentação.

Tabela 5.19 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, variando a dosagem do reagente hexametáfosfato de sódio.

Código do Ensaio	Recuperações		IS	Teor		pH	Dispersante
	Mássica	Metalúrgica	Gaudin	SiO ₂ - Conc.	Fe - Rej.		
	(%)	(%)	Adm.	(%)	(%)	Adm.	g/t
F - 04	42,21	92,66	11,43	12,49	3,32	7,0	0 g/t
F - 47	50,43	93,39	6,91	27,46	3,43		40 g/t
F - 52	49,99	93,37	7,07	26,57	3,40		80 g/t

Nos testes de flotação realizados para avaliar a influência da dosagem do reagente dispersante hexametáfosfato de sódio no sistema de flotação, em pH 7,0, pode ser observado na tabela 5.19 que a dosagem de 0,0 g/t do reagente dispersante hexametáfosfato de sódio foi a que obteve maior índice de seletividade GAUDIN (11,43) com um teor de sílica no concentrado de 12,49 %, um teor de ferro no rejeito de 3,32 %, uma recuperação mássica de 42,21 % e uma recuperação metalúrgica de 92,66 %.

A figura 5.49 apresenta os resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da dosagem do reagente dispersante hexametáfosfato de sódio.

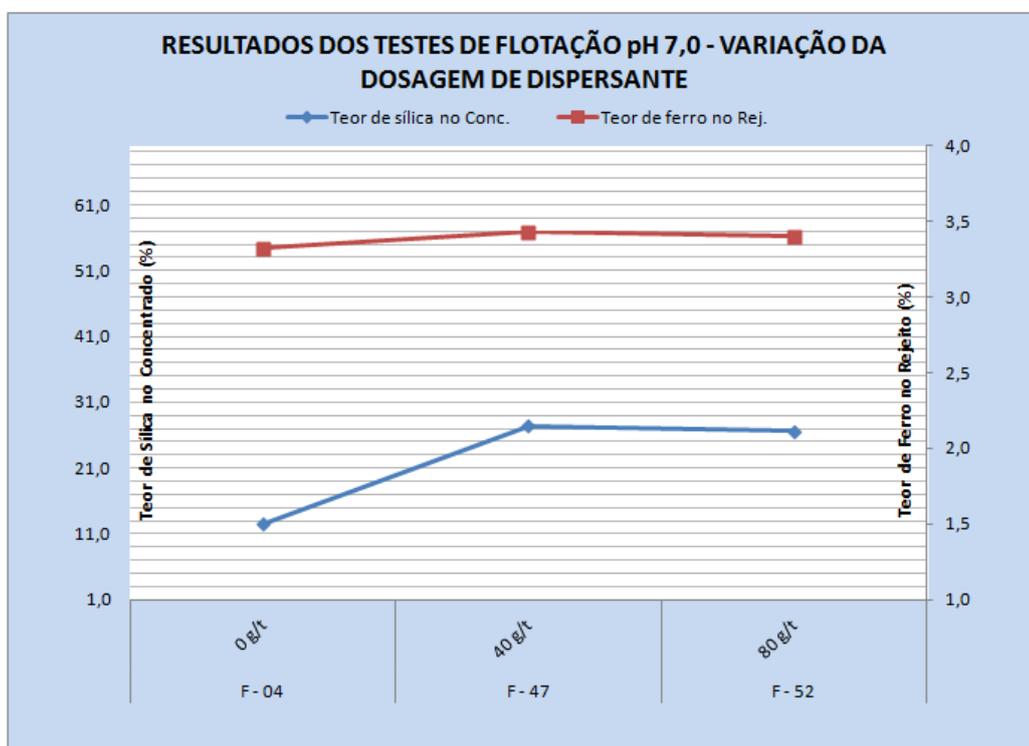


Figura 5.49 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da dosagem do reagente dispersante.

O teor de sílica no concentrado se apresentou na faixa de 12,49 % a 27,46 % e o teor de ferro no rejeito se apresentou na faixa de 3,32 % a 3,43 %.

A figura 5.50 apresenta os resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da dosagem do reagente dispersante.

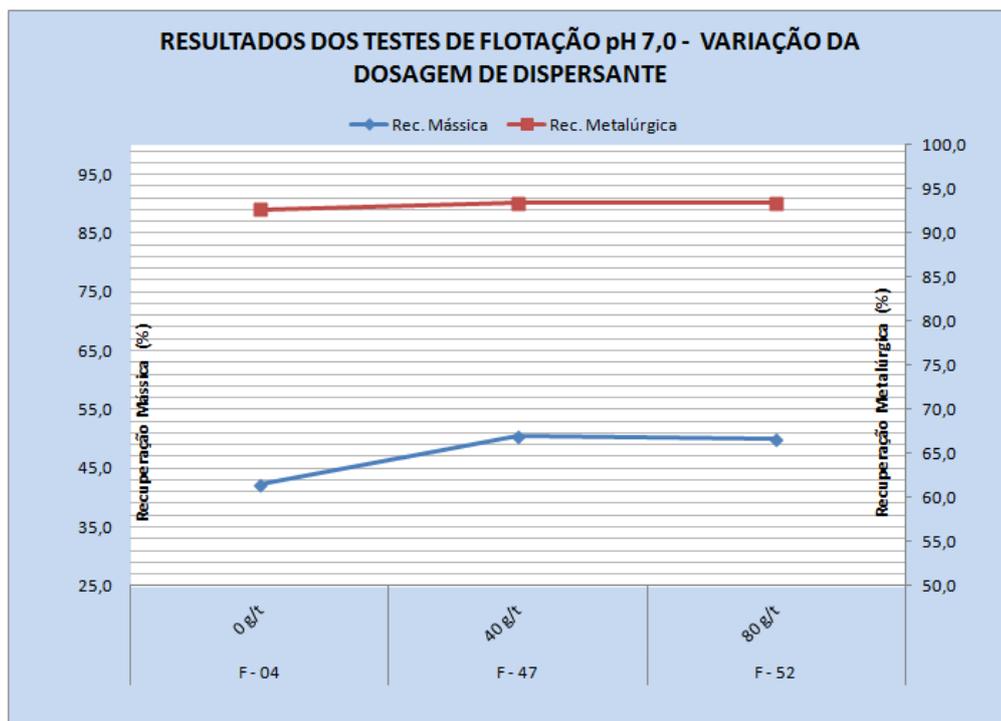


Figura 5.50 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0 utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da dosagem do reagente dispersante.

A recuperação mássica se apresentou na faixa de 42,21 % a 50,43 % e a recuperação metalúrgica se apresentou na faixa de 92,66 % a 93,39 %.

A figura 5.51 apresenta os resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da dosagem do reagente dispersante.

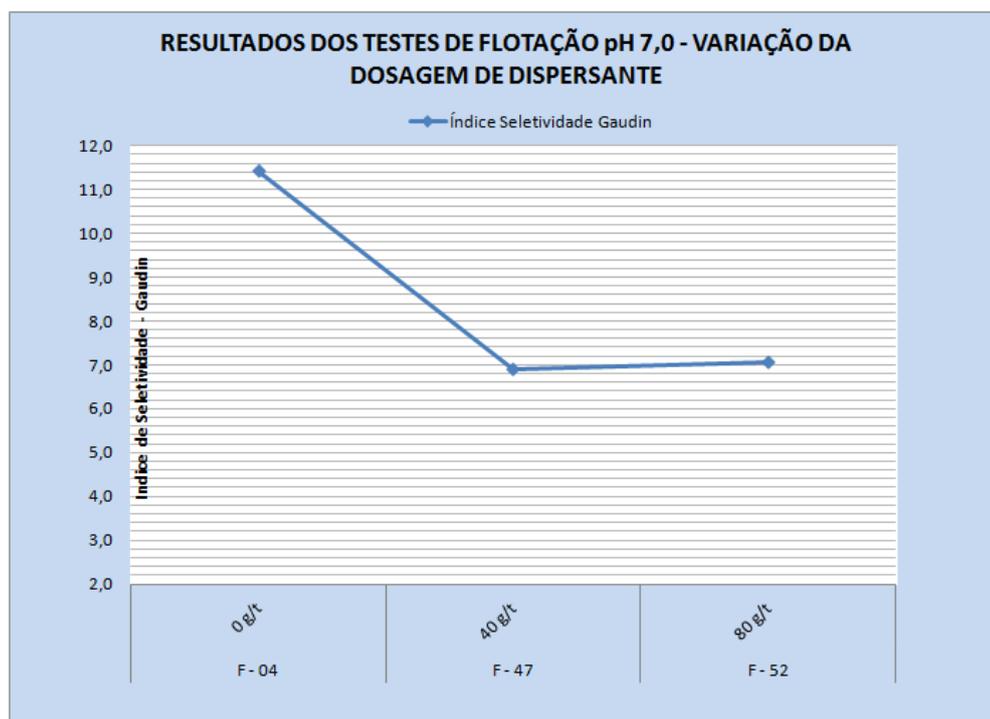


Figura 5.51 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da dosagem do reagente dispersante.

O índice de seletividade GAUDIN se apresentou na faixa de 7,07 a 11,43.

Após esta etapa de definição da dosagem do reagente dispersante hexametáfosfato de sódio, definimos em função das análises dos dados que a melhor dosagem do reagente dispersante hexametáfosfato de sódio foi de 0,0 g/t de alimentação de sólidos. O objetivo desta etapa era definir uma dosagem do reagente dispersante para obter o melhor índice de seletividade, um rejeito com baixo teor em ferro que possa ser descartado e um concentrado com o menor teor de sílica e menor percentual em massa para passar pelas etapas de limpeza.

5.4.17. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 7,0, utilizando o coletor ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, variando a dosagem do reagente depressor

A tabela 5.20 apresenta os resultados dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da dosagem do reagente depressor silicato de sódio, sendo avaliada as dosagens de 0,0 g/t, 500,0 g/t e 1000,0 g/t de sólidos na alimentação.

Tabela 5.20 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, variando a dosagem do reagente silicato de sódio nos testes de flotação.

Código do Ensaio	Recuperações		IS	Teor		pH	Dosagem
	Mássica	Metalúrgica	Gaudin	SiO ₂ - Conc.	Fe - Rej.		
	(%)	(%)	Adm.	(%)	(%)	Adm.	g/t
F - 04	42,21	92,66	11,43	12,49	3,32	pH 7,0	0 g/t
F - 45	48,35	93,92	8,12	23,69	3,03		500 g/t
F - 46	47,16	92,07	7,28	22,99	3,88		1000 g/t

Nos testes de flotação realizados para avaliar a influência da dosagem do reagente depressor silicato de sódio no sistema de flotação, em pH 7,0, pode ser observado na tabela 5.20 que a dosagem de 0,0 g/t do reagente depressor silicato de sódio foi a que obteve maior índice de seletividade GAUDIN (11,43), com um teor de sílica no concentrado de 12,49 %, um teor de ferro no rejeito de 3,32 %, uma recuperação mássica de 42,21 % e uma recuperação metalúrgica de 92,66 %.

A figura 5.52 apresenta os resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da dosagem do reagente depressor silicato de sódio.

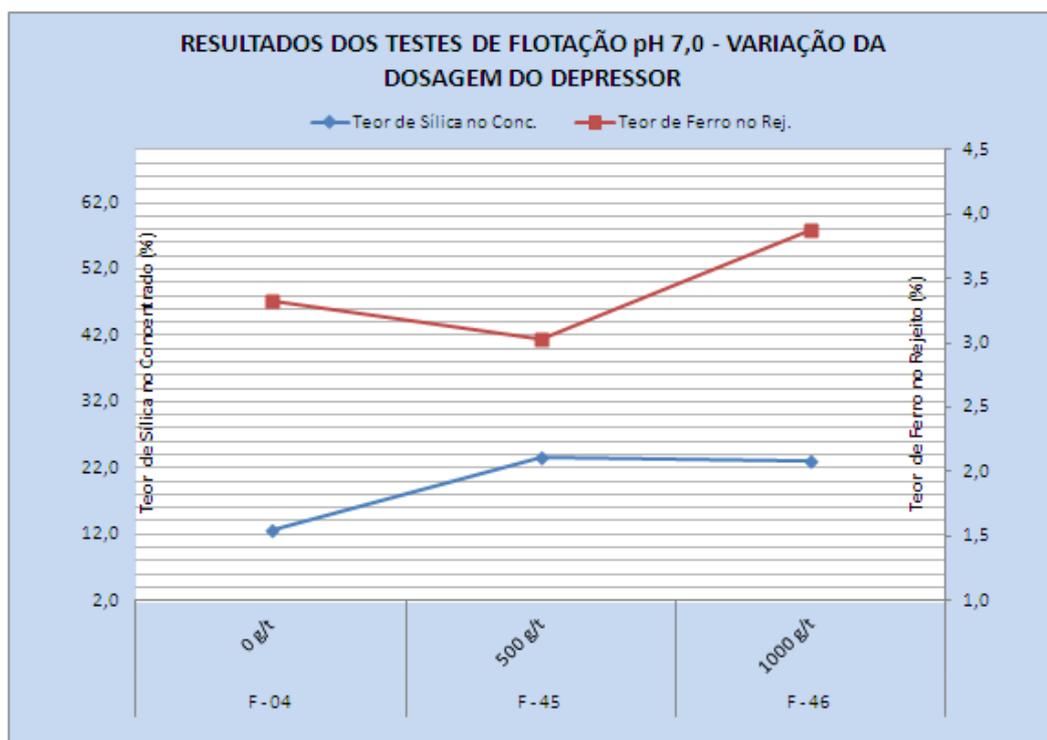


Figura 5.52 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da dosagem do reagente depressor.

O teor de sílica no concentrado se apresentou na faixa de 12,49 % a 23,69 % e o teor de ferro no rejeito se apresentou na faixa de 3,03 % a 3,88 %.

A figura 5.53 apresenta os resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da dosagem do reagente depressor.

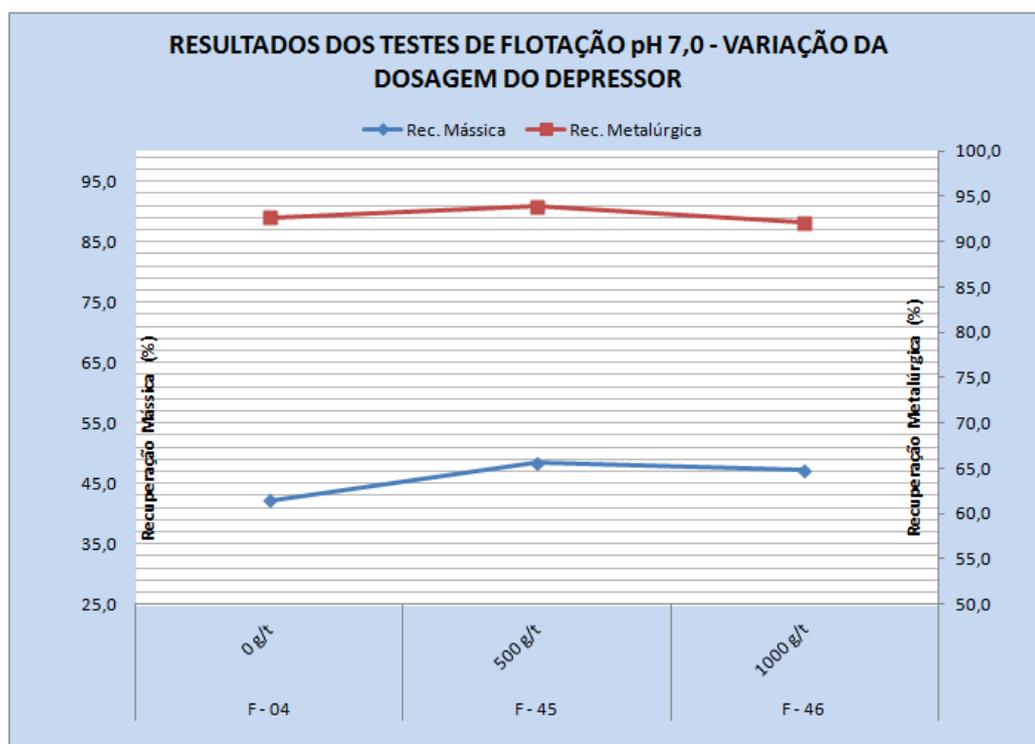


Figura 5.53 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0 utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da dosagem do reagente depressor.

A recuperação mássica se apresentou na faixa de 42,21 % a 48,35 % e a recuperação metalúrgica se apresentou na faixa de 92,07 % a 93,92 %.

A figura 5.54 apresenta os resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da influência da dosagem do reagente depressor.

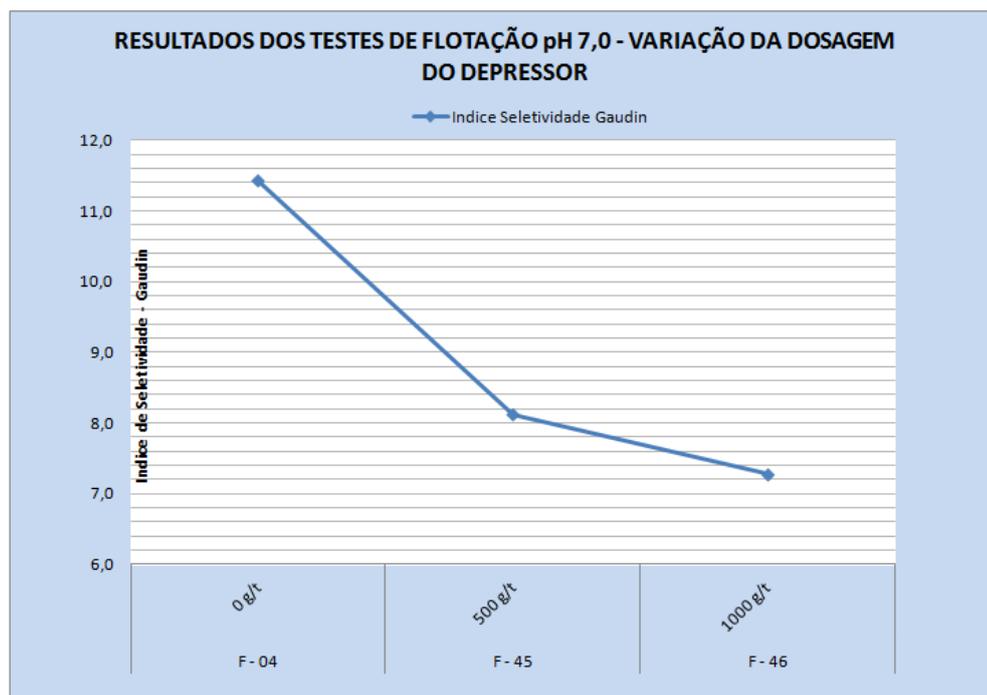


Figura 5.54 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na dosagem de 300 g/t_{alimentação}, para avaliação da dosagem do reagente depressor.

O índice de seletividade GAUDIN se apresentou na faixa de 7,28 a 11,43.

Após esta etapa de definição da dosagem do reagente depressor silicato de sódio, definimos em função das análises dos dados que a melhor dosagem do reagente depressor silicato de sódio foi de 0,0 g/t de alimentação de sólidos. O objetivo desta etapa era definir uma dosagem do reagente depressor para obter o melhor índice de seletividade, um rejeito com baixo teor em ferro que possa ser descartado e um concentrado com o menor teor de sílica e menor percentual em massa para passar pelas etapas de limpeza.

5.4.18. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 7,0, utilizando o coletor ácido oléico, variando a dosagem do mesmo

A tabela 5.21 apresenta os resultados dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido, para avaliação da dosagem do mesmo, sendo avaliada as dosagens de 100,0 g/t, 125,0 g/t, 150,0 g/t, 175,0 g/t, 300,0 g/t e 325,0 g/t de sólidos na alimentação.

Tabela 5.21 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, variando a dosagem do mesmo nos testes de flotação.

Código do Ensaio	Recuperações		IS	Teor		pH	Dosagem
	Mássica	Metalúrgica	Gaudin	SiO ₂ - Conc.	Fe - Rej.		
	(%)	(%)	Adm.	(%)	(%)	Adm.	g/t
F - 31	23,50	53,82	4,99	11,52	15,54	pH 7,0	100 g/t
F - 32	33,92	73,53	5,27	16,15	10,29		125 g/t
F - 33	39,57	83,07	6,46	15,78	7,45		150 g/t
F - 34	38,84	84,20	6,98	15,40	6,65		175 g/t
F - 04	42,21	92,66	11,43	12,49	3,32		300 g/t
F - 57	49,93	95,30	8,70	25,78	2,42		325 g/t

Nos testes de flotação realizados para avaliar a influência da dosagem do reagente coletor ácido oléico no sistema de flotação, em pH 7,0, pode ser observado na tabela 5.21 que a dosagem de 300 g/t do reagente coletor ácido oléico foi a que obteve maior índice de seletividade GAUDIN (11,43) com um teor de sílica no concentrado de 12,49 %, um teor de ferro no rejeito de 3,32 %, uma recuperação mássica de 42,21 % e uma recuperação metalúrgica de 92,66 %.

A figura 5.55 apresenta os resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico, para avaliação da influência da dosagem do mesmo.

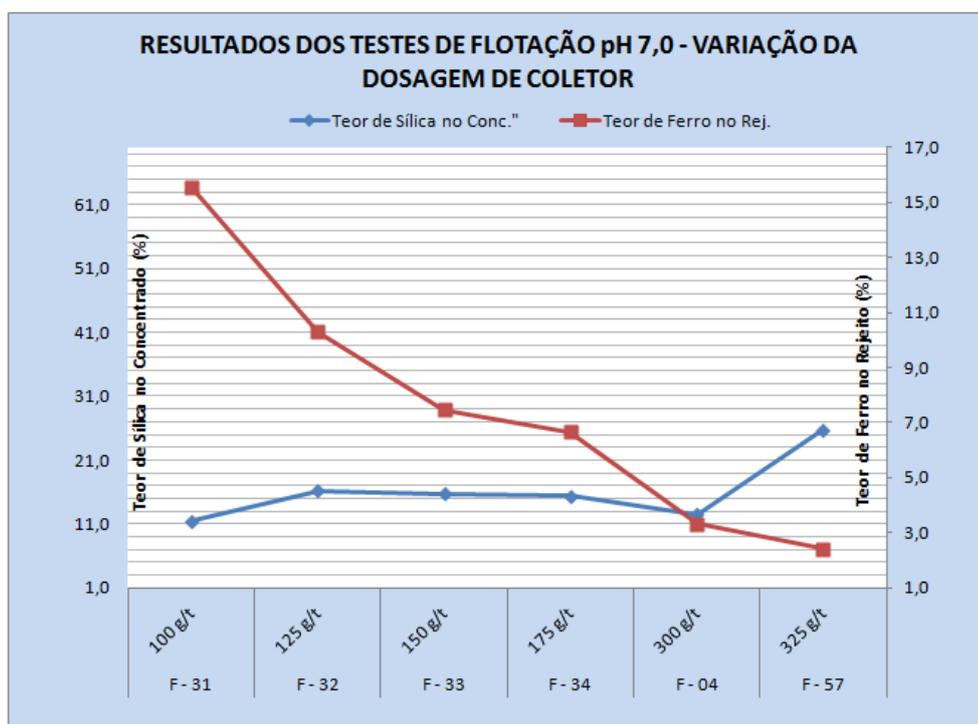


Figura 5.55 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na para avaliação da influência da dosagem do mesmo.

O teor de sílica no concentrado se apresentou na faixa de 11,52 % a 25,78 % e o teor de ferro no rejeito se apresentou na faixa de 2,42 % a 15,54 %.

A figura 5.56 apresenta os resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico para avaliação da influência da dosagem do mesmo.

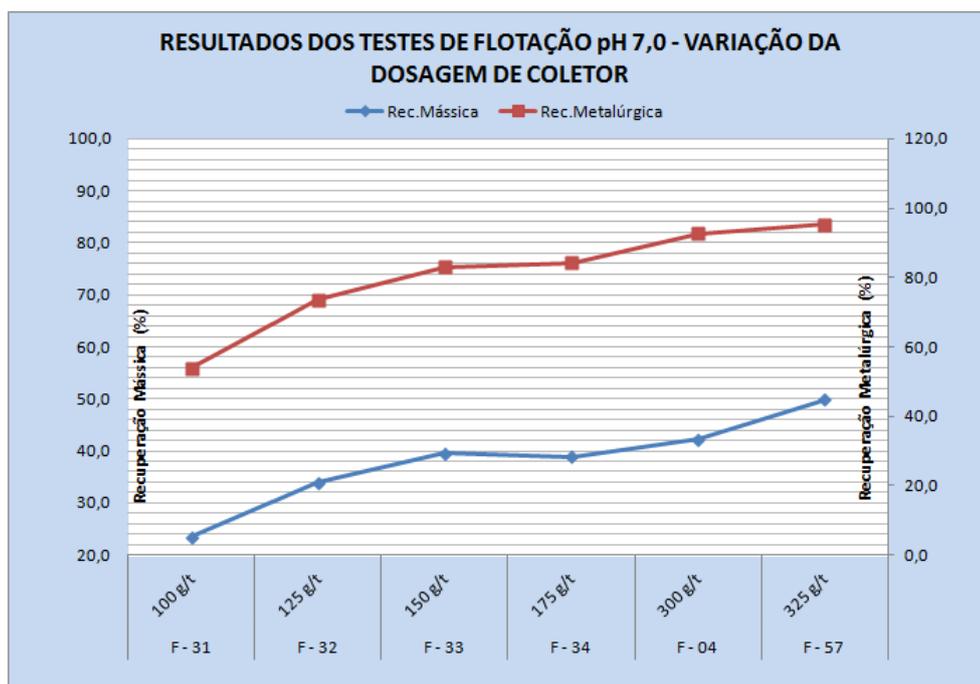


Figura 5.56 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0 utilizando ácido oléico para avaliação da influência da dosagem do mesmo.

A recuperação mássica se apresentou na faixa de 23,50 % a 49,93 % e a recuperação metalúrgica se apresentou na faixa de 53,82 % a 95,30 %.

A figura 5.57 apresenta os resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico para avaliação da influência da dosagem do mesmo.

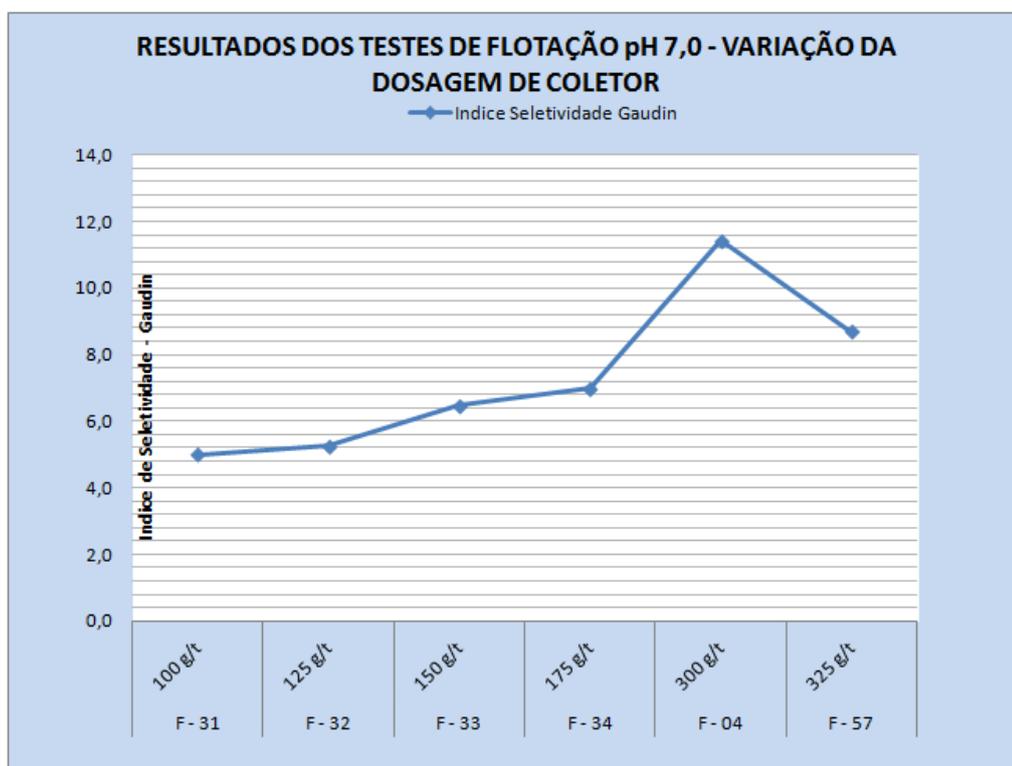


Figura 5.57 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico para avaliação da dosagem do mesmo.

O índice de seletividade GAUDIN se apresentou na faixa de 4,99 a 11,43.

Após esta etapa de definição da dosagem do reagente coletor ácido oléico, definimos em função das análises dos dados que a melhor dosagem do reagente coletor ácido oléico foi de 300,0 g/t de alimentação de sólidos. O objetivo desta etapa foi definir uma dosagem do reagente ácido oléico para obter o melhor índice de seletividade, um rejeito com baixo teor em ferro que possa ser descartado e um concentrado com o menor teor de sílica e menor percentual em massa para passar pelas etapas de limpeza.

5.4.19. Resultados dos testes em escala de bancada em pH 7,0, utilizando o coletor ácido oléico, realizando etapas de limpeza no concentrado

A tabela 5.22 apresenta os resultados dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico, para avaliação da quantidade de etapas de limpeza no concentrado. Foram avaliadas 4 (quatro) etapas de limpeza no concentrado. Nas tabelas 5,23 a 5,27 são mostrados os resultados dos testes referentes às diversas etapas de limpeza.

Tabela 5.22 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, variando as etapas de limpeza no concentrado dos testes de flotação.

ETAPA	Recuperações		IS	Teor		pH	Dosagem
	Mássica	Metalúrgica	Gaudin	SiO ₂ - Conc.	Fe - Rej.		
	(%)	(%)	Adm.	(%)	(%)	Adm.	g/t
Etapa <i>Rougher</i>	42,20	93,10	11,48	13,24	3,13	pH 7,0	300 g/t
Etapa 1º <i>Cleaner</i>	37,84	91,64	18,91	4,72	3,53		300 g/t
Etapa 2º <i>Cleaner</i>	36,31	90,85	31,22	1,67	3,77		300 g/t
Etapa 3º <i>Cleaner</i>	35,72	90,09	40,05	0,95	4,04		300 g/t
Etapa 4º <i>Cleaner</i>	35,50	89,62	39,75	0,92	4,22		300 g/t

Tabela 5.23 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, etapa *rougher*.

Teste Flotação - Etapa <i>Rougher</i>									
Parâmetros	Massa(g)	Composição Química (%)						Recuperações (%)	
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	P	PPC	Mássica	Metálica
Alimentação (Analisada)	250,00	25,78	60,33	0,26	0,68	0,010	1,28	42,20	93,10
Alimentação (Calculada)	249,79	26,21	60,15	0,24	0,62	0,012	1,22		
Concentrado	105,42	57,82	13,24	0,26	1,23	0,022	2,35	Seletividade "Gaudin" (Adm) 11,48	
Rejeito	144,37	3,13	94,40	0,23	0,17	0,005	0,40		

Tabela 5.24 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, etapa *rougher / cleaner 1*.

Teste Flotação - Etapa <i>Rougher / Cleaner 1</i>									
Parâmetros	Massa(g)	Composição Química (%)						Recuperações (%)	
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	P	PPC	Mássica	Metálica
Alimentação (Analisada)	250,00	25,78	60,33	0,26	0,68	0,010	1,28	37,84	91,64
Alimentação (Calculada)	249,79	26,21	60,15	0,24	0,62	0,012	1,22		
Concentrado	94,53	63,47	4,72	0,26	1,31	0,025	2,54	Seletividade "Gaudin" (Adm) 18,91	
Rejeito	155,26	3,53	93,89	0,23	0,20	0,005	0,42		

Tabela 5.25 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, etapa *rougher* / *cleaner* 1 / *cleaner* 2.

Teste Flotação - Etapa <i>Rougher</i> / <i>Cleaner</i> 1 / <i>Cleaner</i> 2									
Parâmetros	Massa(g)	Composição Química (%)						Recuperações (%)	
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	P	PPC	Mássica	Metálica
Alimentação (Analisada)	250,00	25,78	60,33	0,26	0,68	0,010	1,28	36,31	90,85
Alimentação (Calculada)	249,79	26,21	60,15	0,24	0,62	0,012	1,22		
Concentrado	90,71	65,57	1,67	0,26	1,31	0,026	2,59	Seletividade "Gaudin" (Adm) 31,22	
Rejeito	159,09	3,77	93,49	0,23	0,23	0,005	0,44		

Tabela 5.26 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, etapa *rougher* / *cleaner* 1 / *cleaner* 2 / *cleaner* 3.

Teste Flotação - Etapa <i>Rougher</i> / <i>Cleaner</i> 1 / <i>Cleaner</i> 2 / <i>Cleaner</i> 3									
Parâmetros	Massa(g)	Composição Química (%)						Recuperações (%)	
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	P	PPC	Mássica	Metálica
Alimentação (Analisada)	250,00	25,78	60,33	0,26	0,68	0,010	1,28	35,72	90,09
Alimentação (Calculada)	249,79	26,21	60,15	0,24	0,62	0,012	1,22		
Concentrado	89,21	66,12	0,95	0,26	1,28	0,026	2,58	Seletividade "Gaudin" (Adm) 40,05	
Rejeito	160,58	4,04	93,03	0,24	0,25	0,005	0,47		

Tabela 5.27 – Resultados dos testes de flotação em pH 7,0, utilizando ácido oléico, etapa *rougher* / *cleaner* 1 / *cleaner* 2 / *cleaner* 3 / *cleaner* 4.

Teste Flotação - Etapa <i>Rougher</i> / <i>Cleaner</i> 1 / <i>Cleaner</i> 2 / <i>Cleaner</i> 3 / <i>Cleaner</i> 4									
Parâmetros	Massa(g)	Composição Química (%)						Recuperações (%)	
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	P	PPC	Mássica	Metálica
Alimentação (Analisada)	250,00	25,78	60,33	0,26	0,68	0,010	1,28	35,50	89,62
Alimentação (Calculada)	249,87	26,20	60,13	0,24	0,66	0,012	1,22		
Concentrado	88,71	66,14	0,92	0,26	1,30	0,026	2,58	Seletividade "Gaudin" (Adm) 39,75	
Rejeito	161,08	4,22	92,76	0,24	0,31	0,005	0,47		

Nos testes de flotação realizados para avaliar a necessidade de etapas de limpeza do concentrado, em pH 7,0, pode ser observado na tabela 5.22 que com 2 (duas) etapas de limpeza já é atingido teor de sílica no produto menor que 1,70 %. Caso seja necessário obter teor de sílica menor que 1,0 %, é preciso realizar 3 (três) etapas de limpeza no concentrado. Com 2 (duas) e 3 (três) etapas de limpeza, foram obtidos índices de seletividade GAUDIN de 31,22 e 40,05, com teores de sílica no concentrado de 1,67 % e 0,95 %, teores

de ferro no rejeito de 3,77 % e 4,04 %, recuperações mássicas de 36,31 % e 35,72 % e recuperações metalúrgicas de 90,85 % e 90,09 %.

A figura 5.58 apresenta os resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico, para avaliação das etapas de limpeza.

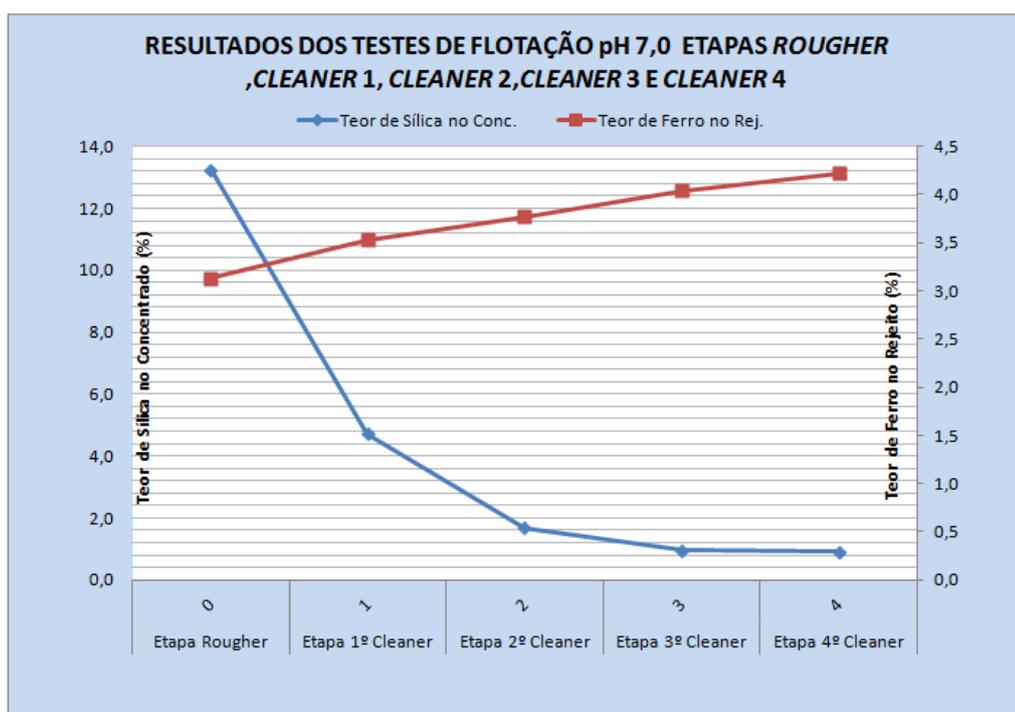


Figura 5.58 – Resultados dos teores de sílica no concentrado e ferro no rejeito dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico na para avaliação das etapas de limpeza.

O teor de sílica no concentrado se apresentou na faixa de 0,92 % a 13,24 % e o teor de ferro no rejeito se apresentou na faixa de 3,13 % a 4,22 %.

A figura 5.59 apresenta os resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico para das etapas de limpeza.

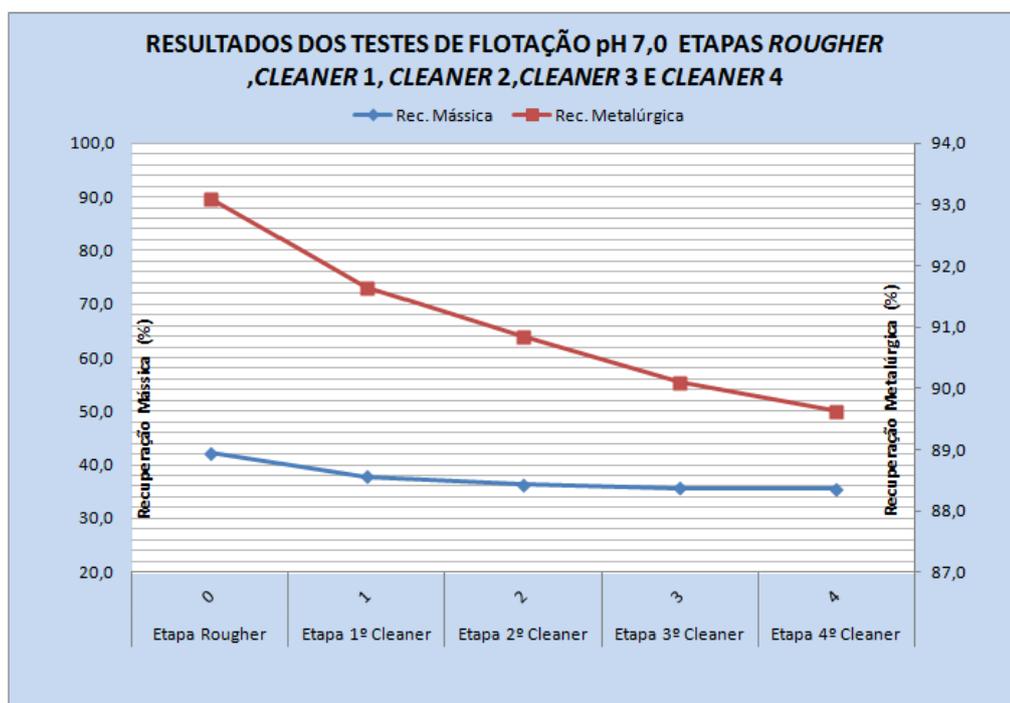


Figura 5.59 – Resultados das recuperações mássica e metalúrgica do ferro dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0 utilizando ácido oléico para avaliação das etapas de limpeza.

A recuperação mássica se apresentou na faixa de 35,50 % a 42,20 % e a recuperação metalúrgica se apresentou na faixa de 89,62 % a 93,10 %.

A figura 5.60 apresenta os resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico para avaliação das etapas de limpeza.

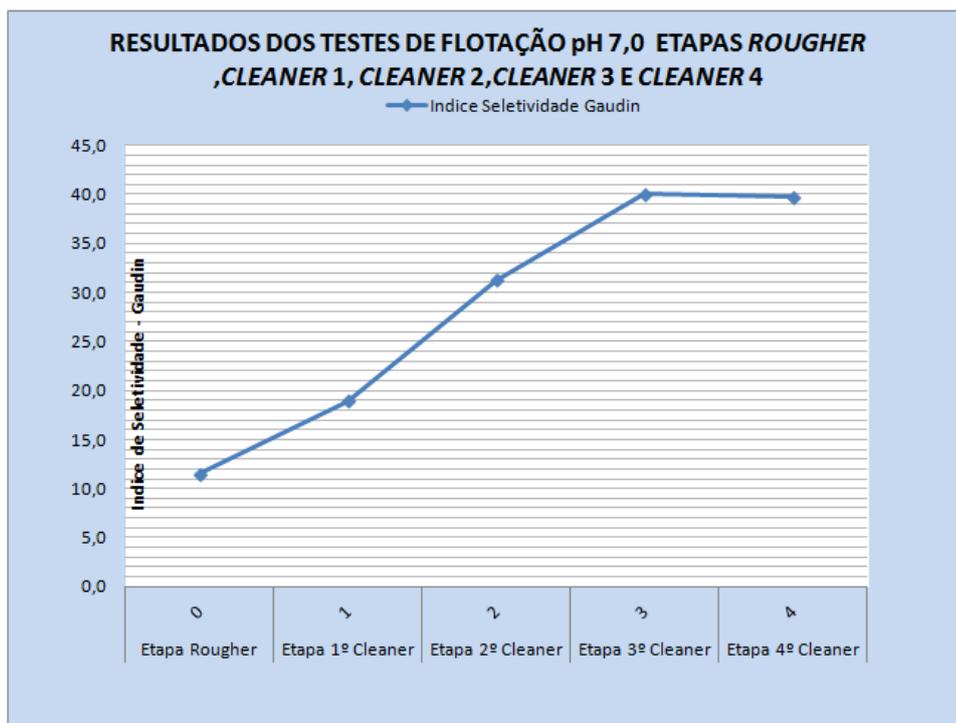


Figura 5.60 – Resultados do índice de seletividade GAUDIN dos testes de flotação em escala de bancada em pH 7,0, utilizando ácido oléico para avaliação das etapas de limpeza.

O índice de seletividade GAUDIN se apresentou na faixa de 11,48 a 40,05.

Uma análise superficial da dosagem de coletor pode dar uma falsa impressão de que 300 g/t de sólidos alimentado seja uma dosagem muito alta e que geraria um alto custo se comparado com as dosagens utilizadas de coletores usados na flotação catiônica reversa. Se a análise for realizada considerando as condições desta investigação que não necessitou de outros reagentes como depressor, dispersante, espumante, modulador de pH para a flotação e modulador de pH para a filtração, maior recuperação em massa que o processo de flotação reversa e conseqüentemente menores massas de rejeito reduzindo o custo de deposição em barragem e prolongando a vida útil da mesma, este processo passa a ser extremamente vantajoso para as mineradoras.

6. CONCLUSÕES

Nas condições consideradas otimizadas para esta amostra, conseguiu-se um concentrado com teores abaixo de 1% de sílica e teores de sílica + alumina abaixo de 2%, o que qualifica os concentrados obtidos para produção de pelotas de redução direta.

A excelente seletividade do processo com ácido oléico possibilitou atingir teores de rejeitos menores que 5,0 % de Fe em circuito aberto com até 4 (quatro) limpezas no concentrado. Este teor pode ainda ser reduzido em circuito fechado com a adição de etapas recuperadoras (*scavenger*).

Uma análise superficial da recuperação mássica global da ordem de 36,0 % mostra que esta é uma excelente recuperação, visto que o minério alimentado tem teor de ferro em torno de 26,0 % de Fe.

As recuperações metalúrgicas atingiram valores da ordem de 90,0 %, que são valores bastante elevado para o processo de concentração por flotação.

Nos ensaios de flotação em bancada utilizando os coletores: ácido oléico, OGVI óleo graxo vegetal industrial, flotin FS - 1 e flotin FS - 2, o ácido oléico obteve o melhor resultado e foi escolhido neste trabalho, mas o reagente OGVI óleo graxo vegetal industrial e o reagente flotin FS - 2 devem ser melhores estudados, pois os mesmos apresentaram também possibilidade de serem utilizados no processo de flotação direta da hematita.

Neste trabalho, os objetivos foram alcançados utilizando o coletor ácido oléico em pH 7,0 com uma dosagem de 300,0 g/t, sem a necessidade de utilização de qualquer outro reagente como depressor, espumante e dispersante.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudar o comportamento das propriedades das pelotas cruas produzidas a partir de um concentrado de flotação produzido por flotação catiônica reversa e flotação direta da hematita.

Estudar a utilização da flotação direta para outras tipologias de minérios com teores variados de ferro.

Estudar comparativamente a flotação catiônica reversa em função da flotação direta da hematita.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. F. M. & HASSUY, Y. (coords.) (1984) **O Pré-cambriano do Brasil**. São Paulo. Edgard Blücher. 542p.
- ALMEIDA, F. F. M. (1977) **O Cráton do São Francisco**. Ver. Bras. Geoc. v.7. p.349-364.
- ALMEIDA, F. F. M. (1981) **O Cráton do Paramirim e suas relações com o do São Francisco**. In: SBG, Simp. sobre o Cráton do São Francisco e suas Faixas Marginais. Salvador. Anais. p. 1-10.
- APLAN, F. F., FUERSTENAU, D. W. (1962) **Principles of Nonmetallic Mineral Flotation**. In: FUERSTENAU, D. W. Froth Flotation - 50th Anniversary Volume. New York: AIME, c.7, p.170-214.
- ARAUJO, A. C. (1982) **Influência de íons de alumínio e caolinita na flotação catiônica reversa de quartzo e hematita**. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.
- ARAUJO, A. C. (2004) **Introdução ao tratamento de minérios**. In: **Livro de Tratamento de Minérios**. Departamento de Engenharia de Minas. Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, p.1-8.
- BORGES, A. M. B. (1993) **Arraste na flotação catiônica reversa de minérios de ferro**. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.
- BRANDÃO, P. R. G. (2003) **Flotação de oxi-minerais**. In: **Apostila de Flotação**. Departamento de Engenharia de Minas. Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, p.61-89.

- CASTRO, E. B. (2002) **Influência de finos na flotação do minério de ferro: efeitos da granulometria e da mineralogia**. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.
- CASTRO, E. B., CRUZ, M. R., (2003) **Modificação do circuito de flotação da planta de beneficiamento de Vargem Grande**. Anais: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, Ouro Preto.
- CHUKRHOV, F. V., et al. (1973) **Ferrihydrite**. *Izvest. Akad. Nauk. SSSR*, p.23-33, apud SCHWERTMANN, U., TAYLOR, R.M. (1977) **Minerals in Soil Environments**. Dixon, J. B. (ed). p.145-180.
- COELHO, E. M. (1984) **Beneficiamento de minérios de ferro**. 1984. Tese (Concurso para professor titular)-Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte. Cap.3.
- CRISTIE, T., BRATHWAITE, B. (1997) **Mineral commodity report 15 – iron**. New Zealand: Institute of Geological and Nuclear Sciences Ltd.
- DANA, J. D. (1976) **Manual de mineralogia**. Rev. Cornelius S. Hurlbut, Jr. Trad. Rui Ribeiro Franco. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, v.1, p.303-342.
- DERR, W. A., HOWIE, R. A., ZUSSMAN, J. (1977) **An introduction to the rock-forming minerals**. London: Longman, 628p.
- DORR II, J. V. N. (1959). **Esboço Geológico do Quadrilátero Ferrífero de MG**. In: DNPM-USGS. Publicação Especial 1.
- DORR II, J. V. N. (1964). **Ocorrências e classificação de minérios de ferro do quadrilátero ferrífero**. Semana de Estudos sobre Padronização dos Minérios.

DORR II, J. V. N. (1969). **Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil**. In: Geological Survey Professional Paper, 641-A. Washington: United States Government Printing Office.

Enciclopédia livre Wikipedia **Estrutura Interna da Terra**. Disponível em: http://pt.wikipedia.org/wiki/Estrutura_interna_da_Terra, acessado em 22/01/2012.

ENDO, I. (1988). **Análise estrutural qualitativa do minério de ferro e encaixantes, na mina de Timbopeba – Borda Leste do Quadrilátero Ferrífero, Mariana – MG**. Ouro Preto. Departamento de Geologia/EM, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 73p.

ERIKSSON, K. A., (1995) **Crustal growth, surface processes and atmospheric evolution on the early Earth**. In: COWARD, M.P. and RIES, A.C. (eds.), **Early Precambrian Processes**. Geological Society London, Special Publication 95, 11- 25.

EVANS, A. (1987) **An introduction to ore geology**. In: EVANS, A. **Deposits of sedimentary and volcanic environments**. Oxford: Blackwell Scientific. Cap.16, p. 195-213.

FERREIRA, E. E. (2004) **Lamas de minério de ferro: agregação/dispersão e reologia**. Tese de Doutorado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.

FERREIRA, V. M. (2002) **Avaliação da produção de um superconcentrado de minério de ferro**. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral). Escola de Minas da UFOP, Ouro Preto.

- FUERSTENAU, M. C. (1976). **Flotation**. A. M. Gaudin Memorial. Volume. **Cationic flotation of oxides and silicates**. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc., v.1, p.87-116, New York.
- FUERSTENAU, D. W. (1980) **Fine particles flotation**. In: SOMASUNDARAN, P. Fine particles processing, v.1, c.35, p.669-705.
- GARRELS, R. M., PERRY, E. A., MACKENZIE, F. T. (1973) **Genesis of precambrian iron-formation and the development of atmospheric oxygen**. Economic Geology, v.68, p.1173-1175.
- GAUDIN, A M, 1932. **Flotation**, p 375 (McGrawHill: New York).
- GODICH, S. S. (1973) **Ages of precambrian banded iron-formation**. Economic Geology, v.68, p.1126-1134.
- HOUOT, R. **Beneficiation of iron ore by flotation-review of industrial and potential applications**. International Journal of Mineral Processing, v.10, n.3, p. 183-204, 1983.
- Instituto Brasileiro de Mineração IBRAM. **Estatística Panorama Mineral Brasileiro. Minério de ferro**. Disponível em: <http://WWW.ibram.org.br/sites/1300/1382/00000039.pdf> acessado em 22/01/2012.
- IWASAKI, I. (1983) **Iron ore flotation, theory and practice**. Mining Engineering, p.622-631.
- JAMES, H. L. (1954) Sedimentary facies of iron-formation. **Economic Geology**, v.49, p.253-293.
- JAMES, H. L. (1973) Sedimentary facies of iron-formation. **Economic Geology**, v.68, p. 1126-1134.

- JAMES, H. L., SIMS, P. K. (1973) Precambrian iron-formations of the world. **Economic Geology**, v.68, p.913-914.
- JESUS, C. A. G. (2004) **Ferro**. In: **Sumário Mineral 2004**. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, p.64-65.
- KLASSEN, V. I., MOKROUSOV, V. A. (1963). **An introduction to the Theory of Flotation**. Butterwerths, London, 493p. apud ARAUJO, A. C. (1982) **Influência de íons de alumínio e caolinita na flotação catiônica reversa de quartzo e hematita**. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.
- KLEIN, C., HURLBUT, C.S., (1999). **Manual of Mineralogy**. John Wiley & Sons, New York.
- LASKOWSKI, J. (1974) **Particle-bubble attachment in flotation**. Minerals Science Engineering, v.6, p.223-235
- LIMA, N. P. (2001) **Comportamento de minérios itabiríticos dos complexos Alegria e Fábrica Nova frente aos processos de deslamagem e flotação**. Dissertação de Mestrado (Curso de pós-graduação em Engenharia da UFMG, Belo Horizonte).
- LIU, Q., ZHANG, Y., LASKOWSKI, J. S. (1996) **The adsorption of polysaccharides onto mineral surfaces: an acid/base interaction**. International Journal of Mineral Processing, v.60, p.229-245.
- LOPES, G.M. **Flotação direta de minério de ferro. Ouro Preto**: Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2009. 175p. (Dissertação de Mestrado).

- MORRIS, R. C. (1985). **Geness of iron ore in banded iron formation by supergene and supergene metamorphic processes -a conceptual model**. In Handbook of Strata-bound and Stratiform Ore Deposits, Vol. 13, Wolf, K. H. (ed.). Amsterdam, Elsevier, 73-235.
- PERES, A. E. C., COELHO, E. M., ARAUJO, A. C. (1980) **Flotação, espessamento, deslamagem e floculação seletiva**. In: COELHO, E. M. **Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia**; In Memorian Prof. Paulo Abib Andrey. Recife: ITEP-CNPq, p. 205-286.
- PERES, A. E. C., SALUM, M. J. G. (2004) **Métodos de concentração**. In: **Apostila de Tratamento de Minérios**. Departamento de Engenharia de Minas. Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, p.109-149.
- POPP, J. H. (1984) **Geologia Geral**. Livros Técnicos e Científicos. Ed. S/A, 283p.
- QUARESMA, L. F. (2001) **Ferro**. In: **Sumário Mineral 2001**. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, p.63-64.
- QUEIROZ, L. A. (2003) **Emprego da atrição na deslamagem: efeitos na flotação reversa de minérios itabiríticos**. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.
- QUAST, K.B. **Flotation of hematite using oleate as collectors**. The Ausimm Proceedings, n.1, p. 7-13, 1999.
- RABELO, P. J. B. (1994) **Estudos de caracterização e redução do teor de fósforo do minério de ferro da mina de Alegria, Mariana, MG**. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.

- RAMDOHR, P. (1980) **The ore minerals and their intergrowths**. 2.ed. Oxford: Pergamon Press Ltd., 1202p.
- SANTIAGO, T. C., ARAUJO, A. C. et al (1993) **Minério de ferro**. In: **Aspectos Tecnológicos Relativos à Preparação de Carga e Operação de Alto-Forno**. ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Belo Horizonte.
- SANTOS, I. J. (2003) **Estudo da produção de concentrados de minério de ferro a partir de rejeitos da Barragem de Germano**. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral). Escola de Minas da UFOP, Ouro Preto.
- SANTOS, L. D., BRANDÃO, P. R. G. (2003) **Variações mineralógicas, morfológicas e microestruturais em minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero, MG, e suas implicações no processamento mineral**. In: IV Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro. p.674-682.
- SCHWERTMANN, U., CORNEL, R. M. (1991) **Iron oxides in the laboratory; preparation and characterization**. Weinheim: VCH, 137p.
- SILVA, D. B., VALADARES, M. C. (1988) **Tratamento de minérios**. Anais: Geologia, beneficiamento, caracterização e análise micro-estrutural de minérios de ferro. Vitória: ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.
- SILVA, G. M. A. (1994) **Estudos sobre o estado de agregação de suspensões de um minério de ferro**. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.

- SIVAMOCHAN, R. (1990) **The problem of recovering very fine particles in mineral processing – A review.** *Internacional Journal of Mineral Processing*, Amsterdam, v.28, p.247-288.
- SOMASUNDARAN, P. (1980) **Principles of Flocculation, Dispersion, and Selective Flocculation.** In: SOMASUNDARAN, P. *Fine particles processing*, v.II, c.48, p.947-976.
- SOUZA JÚNIOR, M. (1994) **Caracterização mineralógica e tecnológica do minério de ferro itabirítico anfibolítico da jazida de Alegria, Mariana, MG.** Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.
- SOUZA, C. C., de ARAUJO, A. C. (1999) **A influência do tamanho da partícula de lama na flotação de minérios de ferro.** In: II Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro: Caracterização, Beneficiamento e Aglomeração, Ouro Preto, ABM, p.73-88.
- SUTHERLAND, K L and WARK. I W. 1955. **Principies of Flotation**, pp 302-304 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy:Melbourne).
- TAGGART, A. F. (1945). **Handbook of mineral dressing.** John Willey and Sons, Inc., p. 1-4, New York.
- TRAHAR, W. J. (1976) **The selective flotation of galena from sphalerite with special reference to effects of particle size.** *International Journal of Mineral Processing*, v.3, p.151-166.
- TURRER, H. D. G. (2004) **Utilização de poliacrilamidas de alto peso molecular na flotação catiônica reversa de minério de ferro.** Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia

Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.

VAN HISE, C. R., and LEITH, C. K. (1911) **Geology of the Lake Superior Region**. U.S. Geological Survey Monograph, v. 52, 641p.

VIANA, P. R. M. (2004) **Prática industrial na indústria de minério de ferro**. In: **Apostila de Tratamento de Minérios**. Departamento de Engenharia de Minas. Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, p.205-225.

YANG, O. C. 1979. **Flotation in systems with controlled dispersion-carrier flotation etc. in Beneficiation of Mineral Fines**: Problems and Research Needs (Eds: P Somasundaran and N. Arbiter), pp 295-308 (American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers: New York).