ROGÉRIO VICENTE CANNONI

Extração do níquel e cobalto do rejeito Caron, através da lixiviação ácida saturada e troca iônica em polpa

Versão Corrigida

São Paulo

2021

ROGÉRIO VICENTE CANNONI

Extração do níquel e cobalto do rejeito Caron, através da lixiviação ácida saturada e troca iônica em polpa

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração:

Engenharia Mineral

Orientador:

Prof. Dr. Arthur Pinto Chaves

São Paulo

2021

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com anuência de seu orientador.

São Paulo, de de 2021.

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Versão Corrigida

CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Cannoni, Rogério Vicente

Extração do níquel e cobalto do rejeito Caron, através da lixiviação ácida saturada e troca iônica em polpa / Rogério Vicente Cannoni; orientador, Arthur Pinto Chaves. – 2021

170 p.

Dissertação (Mestrado) – Versão corrigida. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. São Paulo, 2020. Versão original.

1. Resíduos de mineração 2. Metalurgia Extrativa 3. Hidrometalurgia 4. Níquel I. Chaves, Arthur Pinto, orientador. II. Título.

Dedico este trabalho à minha família,
que sempre me apoiou e incentivou
no atingimento de meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por tudo.

Aos meus pais, por quem sou.

Ao meu irmão, pela amizade.

Ao professor Dr. Arthur Pinto Chaves, pela orientação.

À professora Dra. Denise Croce Romano Espinosa, pela toda ajuda e orientação preliminar.

Ao finado Marco Antonio Angora, pelo apoio e incentivo.

Ao Hector Etcheverry pelo apoio, conhecimento e amizade.

À Bianca Foggiatto pelo todo apoio e amizade.

E a todos que colaboraram direta e indiretamente nesta conquista.

*“O que quer que você faça, faça bem feito.
Faça tão bem feito que, quando as pessoas te virem fazendo,
elas queiram voltar e ver você fazer de novo
e queiram trazer outros para mostrar
o quão bem você faz aquilo que faz.”*

- Walt Disney -

ABSTRACT

Nickel is a metal that has several applications, mainly in obtaining stainless steels, electroplating, production of special alloys, chemicals and batteries. It is extracted from lateritic and sulphide ores and several technological routes are applied to obtain it, and it can be produced in several forms, high-purity metal, ferronickel and salts. Nickel ores have concentrations around 1 to 2% and the tailings generated through the extraction processes contain approximately 0.3 to 0.6%. Another metal of great importance to modern society due to its applications, is cobalt, which is usually found in nickel and copper ores and is considered a by-product of the processes for obtaining these metals. The recovery of nickel and cobalt from the tailings of the nickel production process was studied, in order to obtain a solution of nickel and cobalt sulfate, simultaneously evaluating the selectivity of the processes developed in order to remove iron and magnesium as they are impurities of nickel and cobalt. The studied tailing comes from the Caron process and is stored in a tailings dam. A study was carried out to characterize the tailings dam to assess the distribution of the levels of the metals of interest and the results showed a homogeneous distribution of these elements throughout the dam. The tailing mainly contains iron, silicon, aluminum, magnesium and chromium, with a nickel content of 0.51% and cobalt 0.054%. The suggested process consists of atmospheric leaching of the residue with high concentrations of solids, neutralization, ion exchange in pulp and elution. Atmospheric leaching in sulfuric acid at 50 g / L, 80 ° C, residence time of 48 hours and neutralization with limestone with residence time of 3 hours at a concentration of 270 g / L allowed a nickel recovery of 58.69% and cobalt 82.80%. In this same stage, the recovery of iron was 1.59% and magnesium was 14.75%, showing good selectivity. After the leaching and neutralization steps and in order to increase the levels of nickel and cobalt in the solution and simultaneously increase the selectivity against iron and magnesium, ion exchange tests were carried out on pulp with the use of ion exchange resins of the bis-picolylamine or BPA with a residence time of 4 hours and a volume of resin of 2%. Immediately after the ion exchange stage, the elution process with diluted sulfuric acid and a "bed volume" of 3. The nickel extraction in the pulp and elution ion exchange stages was 59.11%, cobalt of 67.12%, iron of 23.28% and magnesium of 21.72%. The overall yield of the process developed for nickel was 34.69%, for cobalt 55.58%, for iron it was 0.37% and for magnesium it was 3.20%. The selectivity of the process developed between nickel and iron was 93.72, nickel and magnesium was 10.83, cobalt and iron was 150.14 and cobalt and magnesium was 17.35.

Keywords: Nickel, Cobalt, Leaching, Resin in Pulp, Elution, Tailings

RESUMO

O níquel é um metal que possui diversas aplicações, principalmente na obtenção dos aços inoxidáveis, galvanoplastia, produção de ligas especiais, produtos químicos e baterias. É extraído a partir de minérios lateríticos e sulfetados sendo aplicadas diversas rotas tecnológicas para sua obtenção, podendo ser produzido em diversas formas, metal de alta pureza, ferroníquel e sais. Os minérios de níquel apresentam concentrações em torno de 1 a 2% e os resíduos gerados através dos processos de extração contém teores de aproximadamente 0,3 a 0,6%. Outro metal de grande importância à sociedade moderna devido às suas aplicações, é o cobalto, que geralmente encontra-se associado aos minérios de níquel e de cobre e é considerado subproduto dos processos de obtenção desses metais. A recuperação de níquel e cobalto de um resíduo da cadeia produtiva do níquel foi estudada, de modo a obter uma solução de sulfato de níquel e cobalto, avaliando simultaneamente a seletividade dos processos desenvolvidos a fim de remover o ferro e magnésio pois são impurezas aos metais de interesse. O resíduo estudado é oriundo do processo Caron é armazenado em uma barragem de rejeitos. Foi realizado um estudo de caracterização da barragem de rejeitos a fim de avaliar a distribuição dos teores dos metais de interesse e os resultados apresentaram uma boa distribuição desses elementos por toda a barragem. O resíduo contém principalmente ferro, silício, alumínio, magnésio e cromo, sendo o teor de níquel de 0,51% e de cobalto 0,054%. O processo de recuperação proposto consiste na lixiviação atmosférica do resíduo com altas concentrações de sólidos, neutralização, troca iônica em polpa e eluição. A lixiviação atmosférica em meio sulfúrico a 50 g/L, 80°C e tempo de residência de 48 horas e a neutralização com calcário com tempo de residência de 3 horas e uma concentração de 270 g/L permitiu a recuperação de níquel de 58,69% e de cobalto 82,80%. Nesta mesma etapa a recuperação de ferro foi de 1,59% e de magnésio de 14,75% apresentando uma boa seletividade. Após as etapas de lixiviação e neutralização e com o intuito de aumentar os teores de níquel e cobalto na solução e simultaneamente aumentar a seletividade frente ao ferro e magnésio foram realizados ensaios de troca iônica em polpa com a utilização de resinas de troca iônica do tipo bis-picolilamina ou BPA com tempo de residência de 4 horas e volume de resina de 2%. Logo após a etapa de troca iônica aplicou-se o processo de eluição com ácido sulfúrico diluído e “*bed volume*” de 3. A extração de níquel nas etapas de troca iônica em polpa e eluição foi de 59,11%, de cobalto de 67,12%, ferro de 23,28% e magnésio de 21,72%. O rendimento global do processo desenvolvido para o níquel foi de 34,69%, para o cobalto de 55,58%, para o ferro foi de 0,37% e para o magnésio foi de 3,20%. A seletividade do processo desenvolvido entre níquel e ferro foi de 93,72, do níquel e magnésio foi de 10,83, do cobalto e ferro foi de 150,14 e do cobalto e magnésio foi de 17,35.

Palavras chave: Níquel, Cobalto, Lixiviação, Troca Iônica em Polpa, Eluição, Resíduos

Sumário

1. INTRODUÇÃO	18
2 OBJETIVOS	21
3 REVISÃO DA LITERATURA	21
3.1 Níquel.....	21
3.1.1 Propriedades e Aplicações do Níquel	23
3.1.2 Reservas e Mercado de Níquel.....	32
3.1.3 Fontes de Níquel	34
3.1.4 Reciclagem do Níquel	36
3.2 Metalurgia Extrativa do Níquel	41
3.2.1 Processos de extração a partir dos minérios sulfetados	41
3.2.2 Processos de extração a partir dos minérios lateríticos	53
3.2.3 Recuperação de Níquel a partir do Rejeito Caron	75
3.2.4 Processo SALT	79
3.2.5 Lixiviação.....	81
4 MATERIAIS E MÉTODOS	84
4.1 Preparação das amostras de rejeito Caron	86
4.1.1 Amostragem da Barragem de Rejeitos	86
4.2 Caracterização das amostras.....	90
4.2.1 Rejeito Caron	90
4.2.2 Soluções Líquidas	90
4.3 Lixiviação	90
4.4 Neutralização	93
4.5 Extração.....	94
4.5.1 Escolha da Resina de Troca Iônica	95
4.5.2 Ensaio de Extração	96
4.5.3 Ensaio de Eluição.....	97
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	99
5.1 Caracterização das amostras.....	99
5.1.1 Umidade	99
5.1.2 Concentração de níquel	101
5.1.3 Concentração de cobalto	104
5.1.4 Concentração de ferro	107
5.1.5 Concentração de magnésio	109

5.1.3	Granulometria.....	112
5.2	Caracterização da amostra blendada.....	131
5.2.1	Composição química.....	131
5.2.2	Composição mineralógica.....	131
5.2.3	Microscopia eletrônica de varredura.....	133
5.3	Lixiviação	135
5.3.1	Efeito do tempo de residência na extração dos metais	137
5.3.2	Efeito da temperatura na extração dos metais	140
5.3.3	Efeito da concentração de ácido sulfúrico na extração dos metais.....	143
5.3.4	Seletividade.....	147
5.4	Neutralização	154
5.5	Troca iônica em polpa	156
5.6	Eluição	159
5.7	Conciliação dos processos de extração de níquel e cobalto.....	161
6	CONCLUSÕES	162
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	164

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Baterias mais comumente utilizadas.	26
Tabela 2 - Composição metálica das baterias de NiCd.	27
Tabela 3 - Teor dos metais contidos nas baterias de NiMH.....	28
Tabela 4 - Composição química das principais ligas de níquel.....	30
Tabela 5 - Tipos de catalisadores de acordo com suas aplicações.	31
Tabela 6 - Minerais de níquel e de cobalto com a presença de níquel.....	34
Tabela 7 - Principais bactérias encontradas no minério de Talvivaara.....	52
Tabela 8 - Principais produtores de NPI da China.	57
Tabela 9 - Comparação entre os processos Alto-forno, RKEF e Krupp-Renn.....	63
Tabela 10 - Efeito dos aditivos na coalescência das partículas de ferroníquel e na separação magnética.....	67
Tabela 11 - Principais projetos de lixiviação em pilhas para níquel laterítico.	70
Tabela 12 - Operações industriais que aplicavam o processo Caron.....	71
Tabela 13 - Perfil térmico do forno de múltiplos andares.	74
Tabela 14 - Composição química dos minérios de Niquelândia e Pomalaa	80
Tabela 15 - Número de amostras coletadas por furo sondado na barragem do Jacuba.....	88
Tabela 16 - Variáveis avaliadas para os ensaios de lixiviação.	91
Tabela 17 - Planejamento dos ensaios de lixiviação.....	92
Tabela 18 - Principais resinas de troca iônica utilizadas na exploração do Ni e Co.....	96
Tabela 19 - Planejamento dos ensaios de extração e eluição.....	98
Tabela 20 - Resultados das determinações de umidade.	100
Tabela 21 - Concentrações de níquel das amostras de rejeito Caron.	102
Tabela 22 - Concentrações de cobalto das amostras de rejeito Caron.	105
Tabela 23 - Concentrações de ferro das amostras de rejeito Caron.	108
Tabela 24 - Concentrações de magnésio nas amostras de rejeito Caron.	111
Tabela 25 - Porcentagem passante acumulada das amostras que compõem o furo N2.	113
Tabela 26 - Porcentagem passante acumulada das amostras que compõem o furo N5.	115
Tabela 27 - Porcentagem passante acumulada das amostras que compõem o furo N8.	116
Tabela 28 - Porcentagem passante acumulada das amostras que compõem o furo N11.	118
Tabela 29 - Porcentagem passante acumulada das amostras que compõem o furo N14.	119
Tabela 30 - Porcentagem passante acumulada das amostras que compõem o furo N17.	121
Tabela 31 - Porcentagem passante acumulada das amostras que compõem o furo N20.	122
Tabela 32 - Porcentagem passante acumulada das amostras que compõem o furo N23.	124
Tabela 33 - Porcentagem passante acumulada das amostras que compõem o furo E3.....	125
Tabela 34 - Porcentagem passante acumulada das amostras que compõem o furo E5.....	127
Tabela 35 - Porcentagem passante acumulada das amostras que compõem o furo E7.....	128
Tabela 36 - Porcentagem passante acumulada das amostras que compõem o furo E9.....	130

Tabela 37 - Composição química do rejeito do processo Caron – amostra blendada.....	131
Tabela 38 - Composição mineralógica do rejeito do processo Caron.....	132
Tabela 39 - Composição química das principais fases identificadas.	133
Tabela 40 - Composição química dos espectros apresentados na figura 89.	134
Tabela 41 - Composição química dos espectros apresentados na figura 90.	135
Tabela 42 - Resultados dos ensaios de lixiviação e cálculo das extrações dos metais de interesse.	136
Tabela 43 - Medianas dos valores da extração em relação ao tempo de residência da lixiviação.	140
Tabela 44 - Medianas dos valores da extração em relação a temperatura da lixiviação.	143
Tabela 45 - Medianas dos valores da extração em relação a concentração de ácido sulfúrico.	146
Tabela 46 - Seletividade Ni:Fe e Ni:Mg em relação ao tempo de residência.	148
Tabela 47 - Seletividade Ni:Fe e Ni:Mg em relação a temperatura.....	149
Tabela 48 - Seletividade Ni:Fe e Ni:Mg em relação a concentração de ácido sulfúrico.	150
Tabela 49 - Seletividade Co:Fe e Co:Mg em relação ao tempo de residência.	151
Tabela 50 - Seletividade Co:Fe e Co:Mg em relação a temperatura.	152
Tabela 51 - Seletividade Co:Fe e Co:Mg em relação a concentração de ácido sulfúrico.....	153
Tabela 52 - Melhores parâmetros de processo da lixiviação.	154
Tabela 53 - Resultados dos ensaios de neutralização.	154
Tabela 54 - Teores de níquel na solução resultantes da etapa de extração e a eficiência do processo.....	156
Tabela 55 - Teores de cobalto na solução resultantes da etapa de extração e a eficiência do processo.....	156
Tabela 56 - Teores de ferro na solução resultantes da etapa de extração e a eficiência do processo	157
Tabela 57 - Teores de magnésio na solução resultantes da etapa de extração e a eficiência do processo.....	157
Tabela 58 - Teores dos metais no eluente	159
Tabela 59 - Rendimentos globais e seletividades.	161

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Preços históricos do níquel.	22
Figura 2 – Distribuição das aplicações do níquel.	23
Figura 3 - Produção mundial de aços inoxidáveis.....	24
Figura 4 - Produção brasileira de aços inoxidáveis.....	24
Figura 5 - Bateria de NiCd	27
Figura 6 - Bateria de Níquel Metal Hidreto (NiMH).....	28
Figura 7 - Classificação das ligas de níquel.	30
Figura 8 - Reservas Mundiais de Níquel.	32
Figura 9 - Maiores empresas produtoras de níquel em 2018.....	33
Figura 10 - Maiores consumidores mundiais de níquel em 2018.....	33
Figura 11 - Minério sulfetado de níquel - pentlandita. Amostra da mina de Sudbury – Canadá... 35	
Figura 12 - Minério garnierítico. Amostra da Nova Caledônia.....	36
Figura 13 - Fluxograma do processo de reciclagem de aços inoxidáveis.....	37
Figura 14 - Fluxograma do processo BATENUS.....	38
Figura 15 - Fluxograma do processo pirometalúrgico de reciclagem das baterias NiCd.....	39
Figura 16 - Fluxograma do processo pirometalúrgico de reciclagem das baterias de NiMH.....	40
Figura 17 - Fluxograma da unidade de beneficiamento da planta de Fortaleza de Minas	42
Figura 18 - Flotação da unidade de Fortaleza de Minas	43
Figura 19 - Partículas de minério hidrofóbico anexado às bolhas de ar	44
Figura 20 - Forno tipo “flash” de obtenção do matte de níquel.	45
Figura 21 - Foto do interior do forno “flash” de Fortaleza de Minas em operação.	46
Figura 22 - Forno elétrico de obtenção de matte de níquel a partir da escória do forno “flash”. ..	46
Figura 23 - Esferas de níquel geradas através do processo Mond.....	47
Figura 24 - Briquetes de níquel obtidos através da redução de hidrogênio e briquetagem.....	48
Figura 25 - Unidade fabril de Nikkelverk, Noruega.....	49
Figura 26 - Unidade fabril de Talvivaara, Finlândia.....	50
Figura 27 - Pilhas de biolixiviação de Talvivaara.....	51
Figura 28 - Esquema de operação da biolixiviação em pilhas de Talvivaara.	51
Figura 29 - Esquema do processo de biolixiviação em pilhas.....	52
Figura 30 - Definição dos processos de extração de acordo com o minério laterítico.....	53
Figura 31 - Diagrama de fases do sistema SiO ₂ – MgO – FeO dos minérios lateríticos.....	54
Figura 32 - Forno rotativo de calcinação de Doniambo, Nova Caledônia	55
Figura 33 - Sinterização do minério laterítico.	58
Figura 34 - Alto-forno para a produção de NPI.....	59
Figura 35 - Lingotamento do NPI.....	59
Figura 36 - Fluxograma do processo RKEF.	61
Figura 37 - Fluxograma do processo Krupp-Renn.	62
Figura 38 - Curvas de temperatura e comportamento da redução no forno rotativo.	63

Figura 39 - Relação entre temperatura e composição do gás de equilíbrio.....	65
Figura 40 - Relação entre a ocorrência de FeNi e grãos de FeS após a solidificação com sulfato de sódio.....	67
Figura 41 - Autoclave para a lixiviação do minério limonítico de Ravensthorpe.	68
Figura 42 - Fluxograma do processo HPAL.	69
Figura 43 - Operação industrial de Niquelândia, Brasil.	71
Figura 44 - Fluxograma do processo Caron da operação de Niquelândia, Brasil.....	72
Figura 45 - Esquema do forno Nichols Herreshoff.	72
Figura 46 - Lixiviação amoniacal de Niquelândia, Brasil.	75
Figura 47 - Etapa de decantação em contracorrente de Niquelândia, Brasil.....	76
Figura 48 - Diagrama de fases Fe – O.	78
Figura 49 - Microscopia da pelota após aquecimento e resfriamento demonstrando o coalescimento do níquel	78
Figura 50 - Resultados da concentração por beneficiamento térmico do rejeito Caron.	79
Figura 51 - Fluxograma do processo SALT para a exploração dos minérios saprolíticos de baixos teores.	80
Figura 52 - Diagrama de Pourbaix do Ni em água a 25°C	82
Figura 53 - Diagrama de Pourbaix do Co em água a 25°C.....	83
Figura 54 - Diagrama de Pourbaix do Fe em água a 25°C	83
Figura 55 - Diagrama de Pourbaix do Mg em água a 25°C.	84
Figura 56 - Barragem de rejeitos do Jacuba.	85
Figura 57 - Fluxograma geral do método analisado.	86
Figura 58 - Localização dos furos de sondagem da barragem do Jacuba.	87
Figura 59 - Operação de amostragem da barragem de rejeitos.	88
Figura 60 - “Liners” para o armazenamento das amostras coletadas na barragem de rejeitos. ..	89
Figura 61 - Esquema dos ensaios de lixiviação e filtração.....	91
Figura 62 - Eficiência de extração dos metais em meio sulfúrico de acordo com o pH.....	93
Figura 63 - Esquema dos ensaios de neutralização.	94
Figura 64 - Esquema dos ensaios de troca iônica.....	97
Figura 65 - Esquema dos ensaios de eluição.....	98
Figura 66 - Histograma dos valores da umidade das amostras.	101
Figura 67 - “Boxplot” dos dados de umidade das amostras.....	101
Figura 68 - Histograma das concentrações de níquel das amostras de rejeito Caron.	103
Figura 69 - “Boxplot” das concentrações de níquel nas amostras de rejeito Caron.	103
Figura 70 - “Boxplot” com teste de hipóteses para os teores de Ni.	104
Figura 71 - Histograma das concentrações de cobalto nas amostras de rejeito Caron.	104
Figura 72 - “Boxplot” das concentrações de cobalto nas amostras de rejeito Caron.....	106
Figura 73 - “Boxplot” com teste de hipóteses para os teores de Co.	106
Figura 74 - Histograma das concentrações de ferro nas amostras de rejeito Caron.....	107
Figura 75 - “Boxplot” das concentrações de ferro nas amostras de rejeito Caron.....	107

Figura 76 - “Boxplot” com teste de hipóteses para os teores de Fe.	109
Figura 77 - Histograma das concentrações de magnésio nas amostras de rejeito Caron.	110
Figura 78 - “Boxplot” das concentrações de magnésio nas amostras de rejeito Caron.	110
Figura 79 - “Boxplot” com teste de hipóteses para os teores de Mg.	112
Figura 80 - Porcentagem passante acumulada para cada amostra que compõem o furo N2....	114
Figura 81 - Porcentagem passante acumulada para cada amostra que compõem o furo N5....	114
Figura 82 - Porcentagem passante acumulada para cada amostra que compõem o furo N8....	117
Figura 83 - Porcentagem passante acumulada para cada amostra que compõem o furo N11..	117
Figura 84 - Porcentagem passante acumulada para cada amostra que compõem o furo N14..	120
Figura 85 - Porcentagem passante acumulada para cada amostra que compõem o furo N17..	120
Figura 86 - Porcentagem passante acumulada para cada amostra que compõem o furo N20..	123
Figura 87 - Porcentagem passante acumulada para cada amostra que compõem o furo N23..	123
Figura 88 - Porcentagem passante acumulada para cada amostra que compõem o furo E3....	126
Figura 89 - Porcentagem passante acumulada para cada amostra que compõem o furo E5....	126
Figura 90 - Porcentagem passante acumulada para cada amostra que compõem o furo E7....	129
Figura 91 - Porcentagem passante acumulada para cada amostra que compõem o furo E9....	129
Figura 92 - Difratograma obtido da amostra blendada.	132
Figura 93 - Micrografia do rejeito Caron. Aspecto geral do produto.....	133
Figura 94 - Micrografia do rejeito Caron.	134
Figura 95 – Aparato utilizado nos ensaios de lixiviação.	137
Figura 96 - Efeito do tempo de residência em relação à extração de níquel.	138
Figura 97 - Efeito do tempo de residência em relação à extração de cobalto.	138
Figura 98 - Efeito do tempo de residência em relação à extração de ferro.	139
Figura 99 - Efeito do tempo de residência em relação à extração de magnésio.	139
Figura 100 - Representação gráfica das medianas dos valores de extração de cada metal em comparação com o tempo de residência.	140
Figura 101 - Efeito da temperatura em relação à extração de níquel.	141
Figura 102 - Efeito da temperatura em relação à extração de cobalto.	141
Figura 103 - Efeito da temperatura em relação à extração de ferro.....	142
Figura 104 - Efeito da temperatura em relação à extração de magnésio.	142
Figura 105 - Representação gráfica das medianas dos valores de extração de cada metal em comparação com a temperatura da lixiviação.	143
Figura 106 - Efeito da concentração de ácido sulfúrico em relação à extração de níquel.....	144
Figura 107 - Efeito da concentração de ácido sulfúrico em relação à extração de cobalto.	144
Figura 108 - Efeito da concentração de ácido sulfúrico em relação à extração de ferro.	145
Figura 109 - Efeito da concentração de ácido sulfúrico em relação à extração de magnésio....	145
Figura 110 - Representação gráfica das medianas dos valores de extração de cada metal em comparação com a concentração de ácido sulfúrico.	146
Figura 111 - Gráfico da seletividade Ni:Fe e Ni:Mg em relação ao tempo de residência.	148
Figura 112 - Gráfico da seletividade Ni:Fe e Ni:Mg em relação a temperatura.	149

Figura 113 - Gráfico da seletividade Ni:Fe e Ni:Mg em relação a concentração de ácido sulfúrico.	150
Figura 114 - Gráfico da seletividade Co:Fe e Co:Mg em relação ao tempo de residência.....	151
Figura 115 - Gráfico da seletividade Co:Fe e Co:Mg em relação a temperatura.....	152
Figura 116 - Gráfico da seletividade Co:Fe e Co:Mg em relação a concentração de ácido sulfúrico.	153
Figura 117 - Resultados dos ensaios de neutralização.....	155
Figura 118 - Ensaios de neutralização.	155
Figura 119 - Representação gráfica das eficiências de extração de níquel.....	157
Figura 120 - Representação gráfica das eficiências de extração de cobalto.....	158
Figura 121 - Representação gráfica das eficiências de extração de ferro.	158
Figura 122 - Representação gráfica das eficiências de extração de magnésio.....	158
Figura 123 - Resinas TP220 carregadas com Ni, Co, Fe e Mg.....	159
Figura 124 - Teores dos metais no eluente em relação ao BV.	160
Figura 125 - Eluição das resinas TP220.....	160
Figura 126 - Fluxograma do processo de extração de Ni, Co, Fe e Mg do rejeito Caron.....	161

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABINOX	Associação Brasileira do Aço Inoxidável
AL	Atmospheric Leaching
BPA	Bis-picolilamina
DON	Direct Outokumpu Nickel
DRX	Difração de raios-X
EDS	Espectroscopia de raios-X por dispersão de energia
EPAL	Enhanced Pressure Acid Leaching
HPAL	High Pressure Acid Leaching
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometry
IDA	Iminodiacetic Acid
INSG	International Nickel Study Group
ISSF	International Stainless-Steel Forum
LME	London Metal Exchange
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NiCd	Níquel Cádmio
NiMH	Níquel-hidreto Metálico
NPI	Nickel Pig Iron
PLS	Pregnant Leaching Solution
RIP	Resin in Pulp
RKEF	Rotary Kiln Electric Furnace
SALT	Starved Acid Leaching Technology
TOA	Triocil Amina

1. INTRODUÇÃO

O níquel vem sendo utilizado pela sociedade há mais de 150 anos e é utilizado em diversas aplicações (Nickel Institute, 2020). Nos últimos anos, as aplicações do níquel vêm demonstrando um interesse significativo por parte da sociedade e da indústria devido ao aumento do consumo de aços inoxidáveis e pelo aumento vertiginoso da demanda por dispositivos de armazenamento de energia (JIAN PAN, ZHU, *et al.*, 2019).

O níquel encontra-se na crosta terrestre em uma massa de aproximadamente 130 milhões de toneladas, sendo que 60% desse volume corresponde a minérios lateríticos e 40% a minérios sulfetados. As principais reservas de níquel estão localizadas na Indonésia, Austrália, Brasil, Rússia, Cuba, Filipinas, China, Canadá e Estados Unidos (MINERAL COMMODITY SUMMARIES, 2020).

O níquel encontra-se em minerais sulfetados como a pirrotita niquelífera, pentlandita, calcopirita e violarita, e em minérios lateríticos sob a forma de olivina e a serpentina (GOMES, 2010). O níquel também pode ser recuperado a partir de outras fontes, como rejeitos de mineração (COTO, GALIZIA, *et al.*, 2008) e a partir de sucatas de catalisadores utilizados na hidrogenação do óleo de palma (YANG, QI, *et al.*, 2011). Outras formas de reciclagem de níquel são a partir de outros tipos de baterias, principalmente Ni-Cd, íons Li e NiMH, de resíduos da produção dos aços inoxidáveis e a partir de ligas metálicas contendo níquel. Em 2019, a reciclagem do níquel correspondeu a aproximadamente 47% de todo o consumo global (MINERAL COMMODITY SUMMARIES, 2020).

Usualmente, o níquel metálico é extraído através de processos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos, sendo o processo a ser aplicado dependente do mineral que será explorado. Para os minérios lateríticos são utilizados processos hidrometalúrgicos e destacam-se as lixiviações amoniacal, sob pressão, sob alta pressão, em pilhas e mais recentemente a biolixiviação em pilhas e também processos pirometalúrgicos na obtenção do ferroníquel e do gusa niquelífero. Para os minérios sulfetados são aplicados processos de concentração por flotação e o concentrado obtido encaminhado ao processo pirometalúrgico em fornos tipo “flash” (SANCHO, VERDEJA e BALLESTER, 2003).

A produção mundial de níquel vem aumentando no decorrer dos anos, sendo que em 2006 foi de aproximadamente 1,57 milhões de toneladas, enquanto em 2019 foi de 2,7 milhões de toneladas. O maior produtor mundial é a Indonésia com um volume de produção anual de 800 mil toneladas, seguido por Filipinas, Rússia, Nova Caledônia, Austrália e Canadá com produções de 420 mil, 270 mil, 220 mil, 180 mil e 180 mil toneladas anuais respectivamente (MINERAL COMMODITY SUMMARIES, 2020).

A demanda mundial de níquel cresceu em 2019, 4% em relação ao ano anterior devido à forte demanda para a produção de aços inoxidáveis e pela maior utilização nas baterias de veículos elétricos pois o níquel promove maior densidade de energia permitindo maior autonomia desses dispositivos. A previsão da utilização de baterias no mundo sofrerá um crescimento de 3 a 4% nos próximos anos representado cerca de 15 a 20% da produção mundial de níquel (Roskill,

2019). O crescimento da demanda do níquel também deve-se ao fato deste metal ser aplicado em tecnologias de baixas emissões de carbono como em superligas à base de níquel utilizados na infraestrutura da geração de energia renovável como a eólica, solar e biomassa (NAKAJIMA, DAIGO, *et al.*, 2018).

O mercado mundial de níquel evoluiu desde os anos 50, passando por três períodos, pós-guerra (1950 a 1980), primeira crise do petróleo ao final do século XX (1980 a 2000) e o “boom” do milênio e a crise (2001 a 2010). No período pós-guerra os Estados Unidos, por estarem envolvidos em diversos outros conflitos, assumiram o controle de distribuição do níquel e no período entre 1951 e 1957 toda a produção americana foi alocada pelo governo, aumentando sua reserva estratégica. Este fato alinhado à aplicação do níquel na indústria bélica, gerou escassez deste metal para aplicações não militares, fazendo com que os preços de níquel se elevassem. No final dos anos 60, no Canadá, que na época era o maior produtor mundial de níquel, houve uma prolongada série de greves nas principais empresas produtoras, Inco e Falconbridge. Isto ocorreu quando os estoques mundiais de níquel eram baixos e a demanda estava restrita pela oferta. Estas greves ocasionaram aumentos dos preços, o que provocou um aumento do número de projetos “*greenfield*” ao redor do mundo, especificamente na Nova Caledônia, Austrália, República Dominicana e Canadá. Entre os anos 1970 e 1975, os preços do níquel sofreram aumentos, mas no final desse período com o término das operações militares dos Estados Unidos no Vietnã e o início das atividades de produção de níquel na Indonésia pela Inco, fez com que houvesse um aumento significativo da oferta desse metal mas, como os estoques estavam baixos, os preços de níquel mantiveram-se estáveis. Em junho de 1979 a greve das empresas canadenses foi encerrada e desse mês até o final do mesmo ano, a Inco aumentou o preço do níquel em seis vezes, impactando nos outros grandes produtores que estavam com 55 a 60% de suas capacidades de produção com o intuito de reduzirem seus estoques até que os preços do níquel melhorassem. A greve da Inco fez com que surgissem fatos importantes nos preços do metal que em 23 de abril de 1979, foi negociado pela primeira vez na LME, tornando-se o sétimo metal a ser negociado, gerando a partir desse momento informações para a base de negociações dos preços do níquel no mundo, não mais dependendo dos produtores canadenses. No período entre os anos 1980 e 2000 houve a segunda crise do petróleo que ocasionou uma redução significativa no consumo de níquel até o ano de 1985. A partir de 1987 os preços de níquel elevam-se vertiginosamente devido ao grande aumento da demanda por aços inoxidáveis, à baixa oferta do níquel, pois durante a crise dos preços diversos produtores encerraram suas operações e à baixa disponibilidade de sucatas de aço inoxidável. O pico dos preços de níquel foi atingido em 1988 e a partir desse ano outros fatores fizeram com que esses preços sofressem novas quedas principalmente devido à dissolução da União Soviética, pois isso fez com que o maior produtor de níquel da Rússia, Norilsk Nickel fosse parcialmente privatizado, aliado com a redução dos custos com armamentos por parte daquele país que fez com que houvesse uma grande oferta por níquel que começou a ser comercializado com a União Europeia. Entre os anos 2001 e 2010 houve novamente um aumento dos preços do níquel, devido principalmente ao aumento da demanda de aços inoxidáveis no mundo e ao crescimento da economia chinesa, criando uma elevada demanda

pelo níquel e um grande déficit dos estoques mundiais (DOMPIERI, 2014). Os preços do níquel apresentaram, nos últimos anos, grande variação, sendo que em maio de 2007 o preço era de US\$ 53.400/t, em junho de 2014, o preço era de US\$ 18.460/t e em março de 2020, US\$ 11.900/t (LME, 2020). Foi verificado que a partir de 2007 os preços de níquel sofrem nova retração, devido principalmente ao aumento de oferta de níquel no mundo, especificamente pelo fornecimento do gusa niquelífero criado pelos chineses para suprir a demanda interna de níquel reduzindo a sua dependência de minérios importados da Indonésia, Filipinas e Austrália.

O níquel pode ser obtido em diversas formas, dependendo do tipo de minério de que será extraído e do processo a ser aplicado. A partir de minérios sulfetados, o níquel será gerado em forma de mate que posteriormente será refinado através de processos hidrometalúrgicos e/ou eletrometalúrgicos, podendo obter-se sais de níquel como sulfatos, hidróxidos ou carbonatos, briquetes e o níquel eletrolítico. Quando o níquel é explorado a partir de minérios lateríticos há a aplicação de processos pirometalúrgicos para a obtenção de ferroníquel ou do gusa niquelífero. Para estes minérios também são aplicados processos hidrometalúrgicos e/ou eletrometalúrgicos gerando, assim como a partir dos minérios sulfetados, sais, briquetes e níquel eletrolítico (CRUNDWELL, MOATS, *et al.*, 2011).

Neste trabalho é estudada uma rota tecnológica para a recuperação do níquel e do cobalto contidos no rejeito gerado no processo Caron, utilizado para a exploração do minério laterítico de níquel da mina de Niquelândia, localizada no estado de Goiás, através de um processo de lixiviação ácida atmosférica com alta concentração de sólidos e troca iônica em polpa. As variáveis dos processos avaliados foram estudadas em escala de bancada com o intuito de determinar as melhores condições de processo a fim de maximizar os níveis de recuperação do níquel.

Este estudo faz parte do projeto de recuperação dos minérios de baixos teores e dos rejeitos gerados no processamento dos minérios de níquel sulfetados e lateríticos pertencentes à Votorantim Metais, onde diversas tecnologias foram avaliadas com o intuito de mitigar, ou até mesmo eliminar a geração de rejeitos através da recuperação dos metais de interesse como o níquel, cobalto, cobre, cádmio, cromo e terras raras, especificadamente o escândio. Após a recuperação destes metais foi realizado o desenvolvimento da utilização dos materiais resultantes, ricos em silício, alumínio e ferro, na obtenção de materiais cimentícios, promovendo a economia circular.

Além do apelo tecnológico deste desenvolvimento inédito há o apelo ambiental, uma vez que enormes depósitos de rejeitos poderiam vir a ser descomissionados e o apelo da conservação de recursos minerais, pois estaríamos aproveitando valores metálicos que não puderam ser aproveitados devido às limitações do processo Caron. É importante ressaltar que esta preocupação existe e trabalhos anteriores tentaram equacionar o problema de utilização destes rejeitos via Tratamento de Minérios (CHAVES, MASINI, *et al.*, 2004) e processamento pirometalúrgico (TAKANO, MOURÃO, *et al.*, 2011), sem resultados positivos.

2 OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivos:

1. Caracterizar as amostras do rejeito geradas no processo Caron.
2. Avaliar a rota tecnológica de lixiviação atmosférica com alta concentração de sólidos em conjunto com a etapa de neutralização com adição de calcário.
3. Determinar a eficácia das rotas tecnológicas avaliadas, verificando os rendimentos de remoção do níquel e cobalto.
4. Determinar a seletividade do processo SALT para níquel em relação ao Co, Fe e Mg e do cobalto em relação ao Fe e Mg.
5. Determinar as melhores variáveis do processo comparando as taxas de recuperação do níquel.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura referente ao níquel, assim como o panorama mundial deste elemento, ocorrências e processos de obtenção utilizados para a contextualização da importância de sua recuperação a partir de resíduos. Ademais, esta revisão inclui as propriedades do níquel, ocorrência, aplicações e métodos de obtenção, de modo a embasar a proposição da rota de recuperação.

3.1 Níquel

O níquel foi identificado como um elemento em 1751 pelo cientista sueco Alex Cronstedt, mas este metal já era utilizado pelos chineses em uma liga cobre – níquel que era uma substituta da prata. No Ocidente, o níquel teve uma grande importância na década de 1820 quando iniciou-se sua utilização em uma liga de níquel, cobre e zinco, chamada de Prata Alemã, que era utilizada em substituição à prata, mas a maior aplicação do níquel foi quando os Estados Unidos iniciaram a produção das moedas de um centavo de dólar utilizando uma liga de cobre e níquel (CRUNDWELL, MOATS, *et al.*, 2011).

Os preços do níquel são determinados pela Bolsa de Valores de Londres para Metais, LME (*“London Metal Exchange”*) e são estabelecidos em bases diárias. Estes preços são utilizados como referência mundial para as negociações comerciais e são determinados através da correlação entre oferta e demanda e pelo nível dos estoques mundiais (STEPAN, 2015). Na figura 1 é apresentado o histórico dos preços do níquel de 2014 a 2025, sendo a partir de 2020 uma expectativa baseada na oferta e demanda futura, levando-se em consideração novos projetos de produção e aumento da demanda devido à novas aplicações (PLECHER, 2020).

Figura 1 – Preços históricos do níquel.

Fonte: Adaptado de PLECHER (2020).

Em maio de 2007 o preço do níquel atingiu seu valor máximo histórico de US\$ 54.200 por tonelada. Esse aumento foi decorrente da forte demanda chinesa na produção de aços inoxidáveis devido ao investimento maciço em infraestrutura. Este nível pressionou os preços dos aços inoxidáveis tornando os investimentos chineses de baixa rentabilidade. Com isto, surgiu uma demanda do governo chinês em encontrar alternativas para a redução dos custos operacionais da cadeia produtiva dos aços inoxidáveis, tornando-o mais competitivo. A partir dessa demanda, os pesquisadores chineses desenvolveram uma rota tecnológica de obtenção de uma liga de ferro e níquel, que podia ser obtida a partir de minérios com baixos teores de níquel. Essa nova liga, chamada de NPI (“*Nickel Pig Iron*”), ou gusa níquelífera, foi desenvolvida exclusivamente para suprir a necessidade do crescimento da demanda de aços inoxidáveis chineses e consequentemente aumentou a oferta de níquel em nível mundial impactando seus preços, levando-os a patamares muito baixos, atingindo em outubro de 2008, o valor de US\$ 8.810 por tonelada.

Após o impacto da obtenção do NPI pelos produtores chineses de aços inoxidáveis, os preços do níquel começaram a se recuperar e mantendo-se em patamares similares aos valores históricos, ficando em torno de US\$ 13.000 por tonelada. Esse aumento deve-se à forte demanda de níquel para a utilização em baterias, principalmente pelo fato de um maior nível de eletrificação dos veículos e com uma tendência de aumento dos preços nos próximos anos (figura 1).

Para atender à nova demanda de níquel, novas fontes deverão ser desenvolvidas, mas como os recursos minerais de níquel estão apresentando um declínio, tanto em reservas quanto em teor nos minérios, faz-se necessário obter-se o níquel a partir de reciclagem e de resíduos gerados na cadeia produtiva do níquel.

3.1.1 Propriedades e Aplicações do Níquel

O níquel (símbolo Ni, peso atômico 58,71, número atômico 28) é um metal branco-prateado lustroso que possui ponto de fusão de 1453 °C, condutividades térmica e elétrica relativamente baixas, alta resistência à corrosão e oxidação, excelente resistência e tenacidade à temperaturas elevadas e é capaz de ser magnetizado. É atraente e muito durável como um metal puro, e liga-se facilmente com muitos outros metais. Refletindo estas qualidades, o níquel é amplamente utilizado em mais de 300.000 produtos para aplicações de consumo industrial, militar, de transporte, aeroespacial, marítimo e arquitetônico. O público pode reconhecer o níquel nas moedas, pois é usado para esse fim em formas puras ou de liga por muitos países, ou como revestimentos eletrolíticos brilhantes e duráveis no aço (revestimento de níquel). O maior uso, no entanto, é como um metal de liga, junto com o cromo e outros metais na produção de aços inoxidáveis e resistentes ao calor. Eles são usados principalmente na indústria e na construção, mas também para produtos domésticos, como painéis e frigideiras, pias de cozinha etc. Os aços inoxidáveis são produzidos em uma ampla variedade de composições para atender aos requisitos especiais da indústria quanto a resistência à corrosão e ao calor, para promover uma superfície limpa e higiênica para alimentos e outros processamentos (INSG - International Nickel Study Group, 2020).

De fato, cerca de 70% do níquel é usado na fabricação de aços inoxidáveis e 16% em outras ligas de aço e não ferrosas (incluindo “superligas”), geralmente para aplicações industriais, aeroespaciais e militares altamente especializadas. Aproximadamente 8% são usados no revestimento e 9% em outros usos, incluindo moedas, baterias e uma variedade de produtos químicos de níquel (INSG - International Nickel Study Group, 2020) .

Atualmente, praticamente toda a produção de níquel é destinada a apenas cinco classes de produtos (figura 2), produção de aços inoxidáveis (70%), ligas metálicas à base de níquel e cobre (8%), aços especiais e ferro fundido (8%), galvanoplastia (8%) e baterias (5%) (Nickel Institute, 2020).

Figura 2 – Distribuição das aplicações do níquel.

Fonte: Adaptado de Nickel Institute (2020).

3.1.1.1 Aços Inoxidáveis

A produção de aços inoxidáveis vem apresentando um aumento significativo devido ao aumento de sua demanda principalmente para a utilização em embalagens. Do ano de 2009 até o ano de 2019, a produção de aços inoxidáveis apresentou um aumento de mais de 100%, conforme demonstrado na figura 3.

Figura 3 - Produção mundial de aços inoxidáveis

Fonte: ISSF - International Stainless Steel Forum (2020).

No Brasil, a produção de aços inoxidáveis não apresentou o mesmo comportamento mundial, pois a demanda deste tipo de material é praticamente estável e pela ausência de implantação de novas empresas produtoras. A produção brasileira de aços inoxidáveis é demonstrada na figura 4.

Figura 4 - Produção brasileira de aços inoxidáveis

Fonte: ABINOX - Associação Brasileira do Aço Inoxidável (2020).

Os aços inoxidáveis são classificados de acordo com a sua microestrutura que apresentam à temperatura ambiente (CHIAVERINI, 1996). A classificação dos aços inoxidáveis é apresentada da seguinte forma:

- Aços Inoxidáveis Martensíticos: é considerado o menor grupo dos aços inoxidáveis. Possuem maior concentração de carbono possibilitando o aumento de sua dureza através de processos de tratamento térmico. Os teores de níquel nestes aços são muito baixos ou inexistentes (SEITOVIRTA, 2013).
- Aços Inoxidáveis Ferríticos: possuem em sua composição teores significativos de cromo e a presença de níquel é muito baixa ou nula, podendo alcançar teor máximo de 2,5% no aço tipo AISI 414 (CHIAVERINI, 1996). Neste tipo de aço inoxidável é adicionado molibdênio com o intuito de aumentar a resistência à corrosão e em alguns casos há a presença de nióbio e/ou titânio que permitem o aumento da soldabilidade desses aços (SEITOVIRTA, 2013).
- Aços Inoxidáveis Austeníticos: é o maior grupo dos aços inoxidáveis e podem ser subdivididos em cinco subgrupos, Cr-Mn, Cr-Ni, Cr-Ni-Mo, austeníticos de alto desempenho e austeníticos de alta temperatura (SEITOVIRTA, 2013). A concentração de níquel varia de 1%, para os aços do tipo AISI 205, até 22% nos aços inoxidáveis do tipo AISI 310, 310S e 314 (CHIAVERINI, 1996).

O níquel é adicionado nos aços inoxidáveis austeníticos em maiores concentrações e nos martensíticos. A adição de níquel nos aços inoxidáveis promove a formação da microestrutura denominada austenita. O níquel geralmente aumenta a ductilidade e a dureza, além de aumentar a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis permitindo sua utilização em ambientes ácidos. Nos aços inoxidáveis martensíticos, a adição de níquel promove a soldabilidade desses aços (SEITOVIRTA, 2013).

3.1.1.2 Baterias

As baterias são dispositivos que armazenam energia química, e ao incidir uma corrente elétrica, há a conversão desse tipo de energia em energia elétrica. As baterias são classificadas em primárias e secundárias (BRETT e BRETT, 1996).

Baterias primárias são os dispositivos que fornecem trabalho elétrico útil a partir de reagentes contidos no seu interior, que ao se esgotar, são descartadas. Nesta classificação destacam-se três tipos de baterias, a chamada célula de Leclanché ou bateria de Zn / C, as pilhas alcalinas que funcionam com um eletrólito alcalino de hidróxido de potássio e a célula de Zn / Cl, que possui um eletrólito composto por amônia e hidróxido de potássio (TICIANELLI e GONZALEZ, 1998).

As baterias secundárias, são os dispositivos recarregáveis (BRETT e BRETT, 1996), pois neste sistema as reações responsáveis pela geração de energia elétrica podem ser revertidas fazendo com que, após a descarga do sistema, este possa ser regenerado e o número de ciclos

de recarga pode passar de mil (TICIANELLI e GONZALEZ, 1998). Na tabela 1 são demonstradas as baterias mais comumente utilizadas no mercado (BRETT e BRETT, 1996).

Tabela 1- Baterias mais comumente utilizadas.

Bateria	Eletrólito	Material dos Eletrodos		Voltagem	Aplicações	Referências
		Catodo	Anodo			
Primárias						
Zinco / Carbono	NH ₄ Cl / ZnCl ₂ / MnO ₂	C (grafite)	Zn	1,5 V	Fontes de tensão portáteis	BRETT, A.M. et al FRICKE, J.
Alcalinas	NH ₄ Cl / ZnCl ₂ / MnO ₂ NaOH	MnO ₂ / C (grafite)	Zn	1,5 V	Baterias secas de alta qualidade	BRETT, A.M. et al FRICKE, J.
Óxido de Prata / Zinco	KOH	Ag ₂ O / C (grafite)	Zn	1,55 V	Relógios	BRETT, A.M. et al FRICKE, J.
Óxido de Mercúrio / Zinco	KOH	HgO / C (grafite)	Zn		Relógios	BRETT, A.M. et al
Secundárias						
Chumbo / Ácido	H ₂ SO ₄	Pb	Pb		Indústria automobilística	BRETT, A.M. et al
Níquel / Cádmio	KOH	NiO(OH)	Cd	1,2 V	Indústria aeronáutica e eletroeletrônicos	BRETT, A.M. et al FRICKE, J.
Níquel Metal Hidreto	KOH	NiO(OH)	Água	1,2 V	Eletroeletrônicos e veículos elétricos	FRICKE, J.
Íons Lítio	Compostos de lítio em solução orgânica	C (grafite)	Compostos de Lítio com Cobalto	3,6 V	Eletroeletrônicos e veículos elétricos	FRICKE, J.

Fonte: BRETT e BRETT (1996) e FRICKE (2007).

3.1.1.2.1 Baterias de Níquel

Estas baterias são compostas por eletrodos de níquel e o eletrólito alcalino, geralmente uma solução de hidróxido de potássio. Os dois principais tipos de baterias de níquel são a Níquel – Cádmio (NiCd) e a Níquel Metal Hidreto (NiMH) (TICIANELLI e GONZALEZ, 1998). Outra bateria de níquel foi muito utilizada no passado, mais precisamente no início do século XX, desenvolvida por Thomas Edison nos Estados Unidos, era composta por níquel e ferro (DELL e RAND, 2001).

Tanto as baterias de NiCd quanto NiMH utilizam o mesmo eletrodo de níquel, que é o catodo ou eletrodo positivo. O níquel é aplicado na forma de esponja ou por uma lâmina sinterizada, onde deposita-se o hidróxido de níquel (NiO(OH)), que é a substância eletroativa (TICIANELLI e GONZALEZ, 1998).

a. Baterias Níquel Cádmio

As baterias NiCd (figura 5), foram desenvolvidas pelo cientista sueco W. Junger em 1899 e são classificadas em dois tipos, a portátil e a de aplicações industriais. O anodo é constituído por cádmio metálico que após as reações que ocorrem no interior da bateria, se transforma em hidróxido de cádmio (BARANDAS, VALVERDE JR. e AFONSO, 2007). A reação total da bateria é:

As vantagens destas baterias, em comparação com as mais recentes tecnologias, são alta resiliência, tempo reduzido para sua recarga e alta resistência a baixas temperaturas. O efeito clássico de memória refere-se ao eletrodo negativo de cádmio. Estas baterias apresentam um problema pois são facilmente incapacitadas se manuseadas incorretamente, pois os cristais metálicos se acumulam no eletrodo negativo durante o carregamento prolongado com baixa corrente ou durante o carregamento prematuro, iniciado antes que a bateria esteja completamente descarregada (FRICKE, 2007).

Além de níquel e cádmio, há a presença de ferro na composição das baterias de NiCd, conforme apresentado na tabela 2, onde é apresentada a composição em toda a bateria assim como em seus componentes.

Tabela 2 - Composição metálica das baterias de NiCd.

Componente	Concentração Metálica (%)		
	Ni	Cd	Fe
Bateria (total)	26,0	33,5	12,5
Anodo	1,5	65,0	28,0
Catodo	36,0	3,0	55,0

Fonte: RUDNIK, E. e NIKIEL (2007).

Figura 5 - Bateria de NiCd

Fonte: Battery Association of Japan (2020).

b. Baterias Níquel Metal Hidreto

As baterias de NiMH (figura 6), foram desenvolvidas no Japão em 1989 e possuem diversas vantagens como alta capacidade eletroquímica, segurança, boa compatibilidade ambiental, tempo de vida longo, baixa taxa de descarte e podem operar em alta variação de temperatura (LIN, HUANG, *et al.*, 2016).

Estas baterias são compostas basicamente por quatro células conectadas em série no interior de um invólucro plástico. Cada célula possui nove partes, vedação, pólo positivo, mecanismo de alívio de gases, aba positiva, catodo de hidróxido de níquel, separador, anodo (hidreto metálico), pólo negativo e invólucro (TENÓRIO e ESPINOSA, 2001). As baterias de NiMH possuem em sua composição três tipos de materiais, papel, plásticos e materiais metálicos, na proporção 4,58%, 2,57% e 92,9%, respectivamente (LIN, HUANG, *et al.*, 2016). Os materiais metálicos são compostos por diversos elementos como demonstrado na tabela 3.

Tabela 3 - Teor dos metais contidos nas baterias de NiMH.

Elemento	Teor (%)	Elemento	Teor (%)	Elemento	Teor (%)
Ag	0,002	Cr	0,019	Ni	17,900
As	0,003	Fe	15,400	Pb	0,008
Al	0,253	K	1,740	Sb	0,001
Ba	0,003	La	12,100	Ti	0,010
Ca	0,657	Mg	0,001	V	0,002
Ce	5,160	Mn	0,726	Y	0,042
Co	4,410	Na	1,020	Zn	0,795

Fonte: LIN, HUANG, *et al.* (2016).

Figura 6 - Bateria de Níquel Metal Hidreto (NiMH)

Fonte: Battery Association of Japan (2020).

3.1.1.3 Revestimentos

A eletrodeposição consiste na formação de um revestimento metálico sobre uma base que se forma através da redução eletroquímica dos íons metálicos a partir de um eletrólito. Essa tecnologia é também chamada de galvanoplastia. A eletrodeposição do níquel é um dos processos galvânicos mais utilizados pois o níquel promove grande resistência à corrosão para as superfícies sobre as quais é aplicado (GAMBURG e ZANGARI, 2011).

Existem diversos tipos de banhos em que o níquel é utilizado na galvanoplastia, destinando-se cada um a uma aplicação específica. Os principais tipos de banhos de níquel são, banho tipo Watts, banho de alto cloreto, níquel sulfamato e níquel químico (MILLEN JR., 1995).

As vantagens em aplicar-se níquel à superfície dos diferentes materiais são, boa resistência ao desgaste, alta dureza, boa ductilidade, boa condutividade elétrica, alta resistência à corrosão, boa soldabilidade e apresentam bom acabamento do depósito metálico (GAMBURG e ZANGARI, 2011).

3.1.1.4 Ligas de Níquel

Além da utilização do níquel na produção de aços inoxidáveis, este metal é utilizado em muitos outros tipos de ligas metálicas tanto ferrosas quanto não ferrosas. Em alguns tipos de aços, o níquel é adicionado à sua composição como elemento de liga, proporcionando uma elevação significativa na resistência à corrosão desses materiais e aumento da dureza. O níquel é adicionado à diversos tipos de aços como os aços de baixa liga, aços Maraging, aços ao manganês e aços ferramenta. O níquel também é adicionado aos ferros fundidos com o intuito de aumentar a resistência mecânica, sua dureza e a resistência à corrosão (DAVIS, 2000).

As ligas a base de níquel são um dos materiais mais utilizados na indústria aeroespacial (motores), produção de energia (turbinas), proteção ambiental e gerenciamento de resíduos (plantas de dessulfuração de gases), indústria química (tanques, trocadores de calor, válvulas e bombas). Estas ligas são caracterizadas pelo alta resistência à corrosão e alta resistência mecânica a altas temperaturas. As ligas de níquel podem ser classificadas de acordo com o elemento de liga mais importante (KRAMAR, SEKULIC, *et al.*, 2013). Na figura 7 é demonstrada a classificação das ligas de níquel.

Figura 7 - Classificação das ligas de níquel.

Fonte: KRAMAR, SEKULIC, *et al.* (2013).

Na tabela 4 é apresentada a composição química das principais ligas de níquel.

Tabela 4 - Composição química das principais ligas de níquel.

Liga	Composição (%)											
	Ni	Cu	Co	C	Cr	Mn	Mo	Fe	S	Si	Al	Ti
Monel 400	66,50	31,50		0,15		1,00		1,25	0,12	0,25		
Monel 404	54,50	44,00		0,08		0,05		0,03	0,12	0,05	0,03	
Monel R405	66,50	31,50		0,15		1,00		1,25	0,43	0,25		
Monel K-500	66,50	29,50		0,13		0,75		1,00	0,005	0,50	3,00	0,63
Hastelloy B	61,00		2,50	0,05	1,00		28,00	5,00				
Hastelloy C	54,00		2,50	0,08	15,50		16,00	5,50				
Hastelloy N	69,50			0,06	7,00	0,80	16,50	5,00				
Hastelloy X	47,00		1,50	0,10	22,00		9,00	18,50				
Inconel 600	76,00				15,50			8,00				
Inconel 601	60,50				23,00			14,10			1,15	
Inconel 625	61,00				21,50		9,00	2,50			0,20	0,20
Inconel 718	52,50				19,00		3,00	18,50			0,50	0,90
Inconel X-750	73,00				15,50			7,00			0,70	2,50
Incoloy 800	32,50				21,00			46,00			0,38	0,38
Incoloy 804	41,00				29,50			25,40			0,60	0,60
Incoloy 825	42,00	2,25			30,00		3,00	30,00			0,10	0,90

Fonte: EVERHART (1971)

3.1.1.5 Catalisadores

Catalisadores são substâncias cuja característica é proporcionar o aumento da velocidade de uma reação química sem que haja seu consumo durante esse processo. Os catalisadores não alteram o equilíbrio termodinâmico de uma reação química e sim a cinética dessa reação, fazendo com que estes materiais sejam amplamente utilizados nos mais diversos processos industriais promovendo a economicidade onde são aplicados (LLOYD, 2011).

Os catalisadores são classificados de acordo com o material que os compõem e o mesmo catalisador pode ser aplicado a processos industriais distintos (SCHMAL, 2012). Na tabela 5 são demonstrados alguns processos industriais e os tipos de catalisadores utilizados (LLOYD, 2011).

Tabela 5 - Tipos de catalisadores de acordo com suas aplicações.

Processo	Catalisadores Utilizados
Hidrogenação	<ol style="list-style-type: none">1. Níquel metálico em suporte oxidado;2. Níquel Raney;3. Metal precioso depositado em uma base de sílica, carbono ou alumina.
Desidrogenação	<ol style="list-style-type: none">1. Óxido de Ferro com óxido de cromo e carbonato de potássio;2. Óxido de cromo em uma base de alumina;3. Fosfato de níquel e cálcio;4. Óxido misto de cobre e zinco.
Oxidação	<ol style="list-style-type: none">1. Pentóxido de vanádio e sulfato de potássio em uma base de sílica;2. Tela metálica de platina e ródio;3. Óxido de ferro e óxido de molibdênio;4. Prata em uma base de alumina;5. Molibdato de bismuto.
Refino	<ol style="list-style-type: none">1. Sílica e alumina;2. Zeólitas;3. Molibdatos de níquel ou de cobalto;4. Platina com rênio, irídio ou estanho;5. Níquel ou paládio em uma base de zeólita;6. Ácido fosfórico em uma base de terra diatomácea.
Produção de amônia e metano	<ol style="list-style-type: none">1. Níquel em uma base de alumina ou aluminato de cálcio;2. Magnetita com cromo;3. Cobre com alumina e óxido de zinco;4. Níquel com alumina;5. Ferro com potássio, alumina e óxido de cálcio;6. Cobre em uma base de alumina e óxido de zinco.

Fonte: LLOYD (2011).

3.1.2 Reservas e Mercado de Níquel

As reservas de níquel mundiais, com teores médios de acima de 1%, são de aproximadamente 130 milhões de toneladas, sendo 60% do total, minérios lateríticos enquanto 40% são referentes aos minérios sulfetados. O declínio na descoberta de novos depósitos de sulfeto nos distritos tradicionais de mineração está levando as empresas a pesquisarem novos jazimentos em locais mais desafiadores como o centro-leste da África e subártico. Os países que possuem as maiores reservas de níquel são Indonésia, Austrália, Brasil e Rússia (MINERAL COMMODITY SUMMARIES, 2020). As dez maiores reservas de níquel do mundo são apresentadas na figura 8.

Figura 8 - Reservas Mundiais de Níquel.

Fonte: MINERAL COMMODITY SUMMARIES (2020).

Em 2018 a produção mundial de níquel foi de aproximadamente 2,2 milhões de toneladas e a produção das dez maiores empresas produtoras representa 60% desse total (BELL, 2019). A maior produtora mundial de níquel é a Vale com operações de lavra de minério no Brasil, Nova Caledônia, Canadá e Indonésia e refinarias na China, Coreia do Sul, Japão, Grã-Bretanha e Taiwan (Vale Business, 2020). A segunda maior produtora de níquel é a empresa russa Norilsk Nickel com operações na Sibéria (Rússia) e Finlândia. Além de níquel a Norilsk Nickel também produz platina e cobre a partir do mesmo minério, nas operações de Kola e Polar, ambas em território siberiano (BELL, 2019). Na figura 9 são apresentadas as maiores empresas produtoras de níquel assim com a produção de cada uma no ano de 2018.

Figura 9 - Maiores empresas produtoras de níquel em 2018.

Fonte: BELL (2019).

A China correspondeu, em 2018, a aproximadamente 53% do consumo de todo o níquel produzido no mundo, enquanto Estados Unidos consumiram aproximadamente 8,1% ficando em segundo lugar como maior consumidor de níquel (The World Nickel Factbook 2018, 2019). Na figura 10 é apresentada a relação dos maiores consumidores de níquel do mundo.

Figura 10 - Maiores consumidores mundiais de níquel em 2018.

Fonte: SAWE (2019).

3.1.3 Fontes de Níquel

Há diversas fontes de níquel de onde pode ser extraído, como seus minérios, resíduos da mineração e de materiais onde o níquel é utilizado, caracterizando esse tipo de recuperação como reciclagem que será abordado no próximo tópico.

3.1.3.1 Minérios de Níquel

Os minérios de níquel são encontrados em dois tipos de jazimentos, os sulfetados e os lateríticos (BOA, 2018), sendo que os principais estão demonstrados na tabela 6.

Tabela 6 - Minerais de níquel e de cobalto com a presença de níquel.

Minerais de Níquel		Minerais de Cobalto com a presença de níquel	
Mineral	Fórmula Química	Mineral	Fórmula Química
Níquel - Ferro nativo	Ni_3Fe	Ahlfeldita	$(\text{Ni},\text{Co})[\text{SeO}_3] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Pentlandita	$(\text{Fe},\text{Ni})_9\text{S}_8$	Penroseita	$(\text{Ni},\text{Co},\text{Cu})\text{Se}_2$
Bravoita	$(\text{Fe},\text{Ni})\text{S}_2$	Smaltita	$(\text{Co},\text{Fe},\text{Ni})\text{As}_2$
Violarita	Ni_2FeS_4	Tyrrellita	$\text{Cu}(\text{Co},\text{Ni})_2\text{Se}_4$
Polydymita	Ni_3S_4		
Millerita	NiS		
Heazlewoodita	Ni_3S_2		
Siegenita	$(\text{Ni},\text{Co})_3\text{S}_4$		
Linnaeita	$(\text{Co},\text{Fe},\text{Ni})_3\text{S}_4$		
Gersdorffita	NiAsS		
Niccolita	NiAs		
Rammelsbergita	NiAs_2		
Chloantita	$(\text{Ni},\text{Co})\text{As}_{3-x}$		
Smaltita	$(\text{Co},\text{Ni})\text{As}_{3-x}$		
Skutteudita	$(\text{Co},\text{Ni})\text{As}_3$		
Maucherita	$\text{Ni}_{11}\text{As}_8$		
Breithaupita	NiSb		
Ullmannita	NiSb_2		
Parkerita	$\text{Ni}_3\text{Bi}_2\text{S}_2$		
Annabergita	$\text{Ni}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$		
Morenosita	$\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$		
Zaratita	$\text{NiCo}_3 \cdot 2\text{Ni}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$		

Fonte: BOA (2018).

a. Minérios Sulfetados

Os principais minérios sulfetados de níquel são a pentlandita ($(\text{Ni,Fe})_9\text{S}_8$, (figura 11) e a millerita (NiS), encontrando-se frequentemente associados à pirita, pirrotita, e calcopirita (SANCHO, VERDEJA e BALLESTER, 2003). A pentlandita pode ocorrer de forma disseminada em cristais de olivina e na forma maciça, formando grandes concentrações de sulfetos chamados de sulfeto maciço (BOA, 2018).

Figura 11 - Minério sulfetado de níquel - pentlandita. Amostra da mina de Sudbury – Canadá

Fonte: LAVINSKY (2020).

b. Minérios Lateríticos

Os minérios lateríticos de níquel, são amplamente distribuídos nas regiões tropicais do planeta (COTO, GALIZIA, *et al.*, 2008) e são os minérios que sofreram os impactos de intemperismo pois apresentam-se mais superficialmente se comparados aos minérios sulfetados (BOA, 2018). Os minérios lateríticos de níquel são geralmente formados por duas zonas, a limonítica ou oxidada e a zona saprolítica ou garnierítica. A zona limonítica, localizada na porção superior do perfil é rica em óxidos e hidróxidos de ferro de onde a sílica e o magnésio foram lixiviados. Pode conter de 1 a 2% de níquel, associado à goethita e à cromita, apresenta coloração avermelhada e é composta predominantemente por caulinita, goethita, hematita e gibbsita. A zona saprolítica, localizada na porção inferior do perfil, pode conter 1,5 a 2,5% de níquel e é composta predominantemente por silício e magnésio, onde o níquel está presente em argilominerais como serpentina, clorita e esmectitas (MANO, 2013).

Os minérios lateríticos são altamente instáveis e se alteram muito facilmente em zonas superficiais, devido à presença de ferro com número de oxidação 2+ presente na estrutura destes minerais. O Fe^{2+} sofre oxidação na superfície da crosta terrestre transformando-se em Fe^{3+} . Assim, devido às condições oxidantes e levemente ácidas, os minerais como olivina, piroxênio, anfibólio

e serpentina são completamente alterados para a garnierita (ROBB, 2005) (figura 12). Garnierita é um nome genérico atribuído ao minério verde de níquel, que se trata de uma mistura de silicatos hidratados de níquel (BOA, 2018).

Figura 12 - Minério garnierítico. Amostra da Nova Caledônia

Fonte: BETTS (2020).

3.1.3.2 Resíduos da Mineração

Os minérios de baixos teores e rejeitos representam cerca de 75% das reservas totais de certos metais (XIE, XU, *et al.*, 2005). A recuperação de níquel a partir de resíduos de mineração tem sido estudada por diversos pesquisadores. Os principais processos utilizados para a recuperação de níquel, a partir dos resíduos da mineração dos seus próprios minérios, são processos hidrometalúrgicos, envolvendo diversos tipos de lixiviação (COTO, GALIZIA, *et al.*, 2008), (XIE, XU, *et al.*, 2005), (BOTELHO JUNIOR, ESPINOSA e DREISINGER, 2018), e posterior purificação utilizando processos de troca iônica (BOTELHO JUNIOR, ESPINOSA e DREISINGER, 2018) e (LITTLEJOHN e VAUGHAN, 2013).

3.1.4 Reciclagem do Níquel

A produção média do níquel no mundo vem aumentando, de 1980 a 2015, à uma taxa anual de 3,1%. Se esta taxa anual de crescimento for mantida até o ano de 2100 a produção de níquel será doze vezes maior que a produção de 2018, o que não é sustentável, pois as reservas atuais de níquel não suportariam essa demanda (HENCKENS e WORRELL, 2020), por este motivo há a necessidade de suprir a demanda futura de níquel oriundo da sua reciclagem.

As principais fontes de níquel, a partir dos processos de reciclagem, são as sucatas de aços inoxidáveis austeníticos, baterias de níquel e catalisadores. A reciclagem possui diversas vantagens em diversos aspectos como a redução da dependência da utilização de recursos naturais, redução de 90% do consumo energético em relação à obtenção a partir do minério, evita

a geração de resíduos de mineração e necessidade reduzida de áreas para a implantação do parque fabril (CRUNDWELL, MOATS, *et al.*, 2011), além de conservar os recursos naturais.

3.1.4.1 Aços Inoxidáveis

A recuperação de níquel a partir dos aços inoxidáveis consiste basicamente na recirculação interna da sucata de aços inoxidáveis geradas no próprio processo de obtenção, além da sucata adquirida no mercado, as quais apresentam uma qualidade química superior, permitindo a obtenção de um produto de qualidade sem que as perdas de material sejam fatores que impactem significativamente os custos operacionais com perdas mitigadas (CRUNDWELL, MOATS, *et al.*, 2011). Na figura 13, é apresentado o fluxograma de obtenção de aços inoxidáveis com a utilização de sucata.

Figura 13 - Fluxograma do processo de reciclagem de aços inoxidáveis.

Fonte: CRUNDWELL, MOATS, *et al.* (2011).

3.1.4.2 Baterias de Níquel

a. Baterias de NiCd

Diversos processos de reciclagem de níquel a partir das baterias de NiCd vêm sendo utilizados por diversas empresas ao redor do mundo, através de processos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos (ROZÁRIO, SILVA e FREITAS, 2006).

Os processos hidrometalúrgicos de reciclagem de baterias são técnicas eficientes para a recuperação metálica. Foi desenvolvido nos Estados Unidos o chamado processo BATENUS, que consiste em diversos estágios de separação mecânica e posteriormente técnicas hidrometalúrgicas. Após a separação dos materiais plásticos e materiais ferrosos, o material resultante é lixiviado em ácido sulfúrico e os metais são recuperados por eletrólise e eletrodiálise (BERNARDES, ESPINOSA e TENÓRIO, 2003). O fluxograma do processo BATENUS é apresentado na figura 14.

Figura 14 - Fluxograma do processo BATENUS

Fonte: FRÖHLICH e SEWING (1995).

Atualmente os processos pirometalúrgicos para a reciclagem das baterias de NiCd são os processos mais utilizados, como pelas empresas Inmetco (Estados Unidos), Accurec (Alemanha), SabNife (Suécia) e Snam-Svam (França) (RUDNIK, E. e NIKIEL, 2007). As principais vantagens de se utilizar os processos térmicos em relação aos processos hidrometalúrgicos, é o fácil escalonamento da unidade fabril, redução do consumo de agentes químicos e geração direta dos produtos finais como ligas e óxidos metálicos (ASSEFI, MAROUFI, *et al.*, 2020). O processo pirometalúrgico possui uma desvantagem em relação ao processo hidrometalúrgico que é a emissão de gases tóxicos gerados nos processos térmicos (RUDNIK, E. e NIKIEL, 2007). O fluxograma do processo pirometalúrgico de reciclagem das baterias de NiCd é apresentado na figura 15.

Figura 15 - Fluxograma do processo pirometalúrgico de reciclagem das baterias NiCd.

Fonte: ASSEFI, MAROUFI, *et al.* (2020).

b. Baterias NiMH

Assim como a reciclagem das baterias de NiCd, as baterias de NiMH são recicladas em grande parte por processos pirometalúrgicos, mas diversos estudos estão sendo realizados para o desenvolvimento de processos hidrometalúrgicos, focados na recuperação do níquel contido nestes tipos de baterias (ASSEFI, MAROUFI, *et al.*, 2020).

As baterias de NiMH apresentam em sua composição, além do níquel, o ferro, cobalto e terras raras como lantânio, cério, neodímio, disprósio e praseodímio. Cada um desses metais apresenta comportamentos distintos em relação à afinidade com o oxigênio, o que facilita a recuperação das terras raras contidas nos eletrodos das baterias de NiMH. O material que compõe o anodo (hidreto de níquel), é primeiramente oxidado em ar a uma temperatura de 1.000°C, por uma hora, e então reduzido em atmosfera de argônio, a uma temperatura de 1.550 °C, por 1,5 horas, com a adição de um agente redutor, neste caso o ferro, em pó com pureza de 99%. Após a redução, o níquel e o cobalto sofrem difusão com o ferro gerando a liga ferroníquel, enquanto as terras raras são capturadas pela escória (ASSEFI, MAROUFI, *et al.*, 2020). Na figura 16 é apresentado o fluxograma do processo pirometalúrgico de reciclagem de baterias de NiMH.

Figura 16 - Fluxograma do processo pirometalúrgico de reciclagem das baterias de NiMH.

Fonte: ASSEFI, MAROUFI, *et al.* (2020).

As baterias de níquel metal hidreto, também podem ser recicladas através de dois processos hidrometalúrgicos. O primeiro processo consiste na separação mecânica do invólucro plástico, liberando os eletrodos onde estão presentes os metais de interesse. Estes são lixiviados em ácido clorídrico e as terras raras recuperadas através do processo de extração por solventes, utilizando o extratante orgânico D₂EHPA. Após a estripagem das terras raras, estas são precipitadas na forma de oxalatos. O cobalto também é extraído por extração por solventes com a utilização do extratante TOA (trioctil amina) e precipitado como oxalato. O níquel é precipitado diretamente do licor oriundo da lixiviação com a adição de oxalato de amônia. O outro processo hidrometalúrgico de reciclagem das baterias de NiMH consiste na separação mecânica do invólucro plástico liberando o eletrodo. Este é lixiviado em ácido sulfúrico, com isto as terras raras são precipitadas em forma de um sal duplo de sódio e terras raras, adicionando-se hidróxido de sódio (AL-THYABAT, NAKAMURA, *et al.*, 2013).

3.1.4.3 Catalisadores

A recuperação de níquel a partir de catalisadores exauridos é uma técnica muito difundida na indústria, apresentando resultados de eficiência maiores que 98% de recuperação do níquel, através de processos hidrometalúrgicos, utilizando-se ácidos inorgânicos como sulfúrico, clorídrico e nítrico, a temperaturas que variam de 30 a 90 °C. Diversos processos de recuperação do níquel a partir da solução gerada na lixiviação dos catalisadores são utilizados, como a cristalização do sulfato de níquel, precipitação com ácido oxálico após uma sequência de calcinação e redução e purificação com amônia. O oxalato de níquel gerado é então decomposto a 450 °C, gerando o níquel em pó. Também é utilizado o processo de precipitação do níquel na forma de sulfeto e carbonato (MOOSAKAZEMI, MOHAMMADI, *et al.*, 2020).

3.2 Metalurgia Extrativa do Níquel

Existem diversos tipos de processos extrativos de obtenção de níquel, podendo ser aplicados processos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos e eletrometalúrgicos e, na maioria dos casos, há o emprego de dois ou até mesmo os três tipos de processos.

A definição do processo a ser utilizado depende do tipo de minério que será explorado, como no caso de minérios sulfetados aplicam-se os processos pirometalúrgicos e eletrometalúrgicos. No caso dos minérios lateríticos podem ser aplicados os três processos extrativos.

3.2.1 Processos de extração a partir dos minérios sulfetados

Os minérios sulfetados de níquel geralmente apresentam pentlandita (sulfeto de ferro e níquel), associados à calcopirita (sulfeto de cobre e ferro) e à pirrotita. Ambos os sulfetos apresentam metais preciosos em sua composição. Os sulfetos de níquel, contêm cobalto com menor frequência (SANCHO, VERDEJA e BALLESTER, 2003).

Para a recuperação do níquel a partir dos minérios sulfetados, diversos processos industriais são aplicados como técnicas hidrometalúrgicas, pirometalúrgicas e eletrometalúrgicas, geralmente utilizando-se uma mescla de processos com o intuito de obterem-se as maiores taxas de recuperação possíveis. No Brasil há poucas reservas de níquel sulfetado sendo as mais importantes a mina de Fortaleza de Minas, em Minas Gerais, atualmente desativada, Americano do Brasil, em Goiás e a mina de Santa Rita, na Bahia, atualmente explorada pela empresa Atlantic Nickel.

Os teores de níquel nos minérios sulfetados variam de 1 a 2%, havendo a necessidade de aplicarem-se processos de concentração que neste caso, em grande parte das operações de exploração dos minérios sulfetados de níquel, compreendem os processos de cominuição (britagem e moagem) e flotação. Atualmente há aplicação industrial do processo de biolixiviação

em pilhas para este tipo de minério, onde não é aplicada grande parte dos processos de beneficiamento mineral, bastando apenas etapas de britagem.

3.2.1.1 Beneficiamento

O beneficiamento dos minérios sulfetados de níquel é composto basicamente pelos processos de cominuição e flotação. A cominuição consiste em etapas de britagem e moagem que após o processamento do minério, este atinge uma granulometria de aproximadamente 74 μm e consequentemente alimentado na etapa de flotação (SILVEIRA e CHAVES, 2013). Na figura 17 é demonstrado o fluxograma da unidade de beneficiamento da planta de Fortaleza de Minas.

Figura 17 - Fluxograma da unidade de beneficiamento da planta de Fortaleza de Minas

Fonte: VOTORANTIM METAIS (2008).

3.2.1.2 Flotação

A flotação, é um processo de concentração mineral de separação realizada em uma suspensão em água. A diferenciação entre as espécies minerais é dada através da capacidade que suas partículas possuem em se prenderem a bolhas de ar, ou seja, se uma partícula consegue juntar-se ao maior número de bolhas, a densidade do conjunto partícula / bolha torna-se menor que a do fluido, fazendo com que esse conjunto desloque-se verticalmente para a superfície, onde fica retido e é separado em uma espuma, enquanto que as partículas das demais espécies minerais mantêm-se inalteradas (LUZ, SAMPAIO e ALMEIDA, 2004).

A flotação aplicada aos minérios sulfetados de níquel da unidade de Fortaleza de Minas (figura 18), objetiva a obtenção de um concentrado de níquel propício a ser utilizado nos processos

subsequentes de extração como nas etapas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas. A flotação consiste na utilização das etapas “*rougher*”, “*scavenger*” e “*cleaner*”. O circuito é composto por uma etapa “*rougher*”, duas etapas “*scavenger*” operando em contracorrente, enquanto a etapa “*cleaner*” é operada em dois estágios. Após o processo de flotação, o concentrado de níquel sulfetado atinge teores médios de níquel entre 5,5 a 6,5%, que posteriormente será desaguado e seco, atingindo uma umidade máxima de 0,4% (SILVEIRA e CHAVES, 2013).

Figura 18 - Flotação da unidade de Fortaleza de Minas

Fonte: MANO (2002).

Os minérios sulfetados são geralmente hidrofílicos, ou seja, são facilmente “molhados”. Podem ser condicionados com reagentes (coletores), tornando-se hidrofóbicos, ou seja, repelentes à água. As condições químicas podem tornar as partículas seletivamente hidrofílicas ou hidrofóbicas, como por exemplo, a pentlandita pode ser condicionada a ser hidrofóbica, deixando a ganga e a pirrotita hidrofílicas.

As colisões entre as bolhas de ar e as partículas de pentlandita hidrofóbicas promovem a adsorção entre essas partículas às bolhas de ar que se elevam, pois a superfície dessas partículas são hidrofóbicas (figura 19), enquanto as partículas de ganga e pirrotita não são adsorvidas pelas bolhas de ar pois são hidrofílicas, ou seja, preferem permanecer no meio úmido (CRUNDWELL, MOATS, *et al.*, 2011).

Figura 19 - Partículas de minério hidrofóbico anexado às bolhas de ar

Fonte: CRUNDWELL, MOATS, *et al.* (2011).

O mecanismo de reação do coletor com a superfície do minério sulfetado depende da carga da superfície, que por sua vez depende do pH da solução, pois tanto os íons H^+ ou OH^- podem ser adsorvidos pela superfície e assim alterar sua carga (CRUNDWELL, MOATS, *et al.*, 2011), por este motivo o pH na flotação é um parâmetro de controle muito importante.

3.2.1.3 Pirometalurgia

Os processos pirometalúrgicos para o processamento dos concentrados sulfetados de níquel consistem em redução, conversão e volatilização, podendo ser aplicados um, dois ou os três processos em conjunto.

A etapa de redução consiste em alimentar o concentrado de minério sulfetado em um forno do tipo “flash” (figura 20), onde o concentrado sofrerá o processo de ustulação através da reação com o oxigênio oriundo do ar pré-aquecido injetado no forno, simultaneamente à alimentação do concentrado. Desta reação haverá a geração do dióxido de enxofre que será encaminhado a uma etapa de catálise e posterior obtenção de ácido sulfúrico.

O forno tipo “flash” opera a temperaturas em torno de $1.500^{\circ}C$ e o agente redutor é o próprio oxigênio injetado no interior do forno através dos queimadores instalados na chamada “*reaction shaft*”. Não se adiciona carbono ao processo pois este elemento é termodinamicamente inapto em reduzir minérios sulfetados, como aplicados aos minérios oxidados e a reação é exotérmica. A etapa de redução instantânea ou “*flash smelting*” é uma tecnologia amplamente utilizada e reconhecida como o processo INCO, atualmente pertencente à mineradora Vale e o processo DON (“*Direct Outokumpu Nickel*”), tecnologia pertencente à empresa finlandesa Outotec. Em todos estes processos, o níquel concentra-se na forma de matte que contém teores de níquel que variam entre 15 a 25%, 1% de cobre, 50% de ferro e 25% de enxofre. Na figura 21 é apresentado o interior do forno “flash” em operação.

No forno “*flash*” é gerado, além do matte de níquel e SO_2 , a escória, que pode apresentar teores de níquel significativos e pode representar perdas ao processo pirometalúrgico, por isto

utiliza-se um forno elétrico para o processamento desta escória (figura 22). A escória ainda líquida oriunda do forno “*flash*” é alimentada a um forno elétrico que reduzirá essa escória, gerando um segundo matte de níquel, mais pobre comparado ao matte gerado no forno “*flash*”, mas que eleva o nível de recuperação metálica de toda a unidade fabril.

Algumas operações industriais encaminham os mattes gerados tanto no forno “*flash*” quanto no forno elétrico, para os conversores onde, através de alimentação de fundentes, oxigênio e uma fonte de silício, ocorrerá a redução dos sulfetos de ferro presentes, transformando-os em óxido de ferro e, nestas mesmas condições, o sulfeto de níquel permanecerá quase em sua totalidade inalterado. O óxido de ferro gerado será removido pela escória, enquanto o matte de níquel será enriquecido e conseqüentemente aumentará seu valor agregado. O matte obtido na etapa de conversão pode atingir teores de níquel de até 75%, 0,6% de cobalto, 3% de cobre, 1% de ferro e 20% de enxofre (SANCHO, VERDEJA e BALLESTER, 2003).

Figura 20 - Forno tipo “flash” de obtenção do matte de níquel.

Fonte: VOTORANTIM METAIS (2008).

Figura 21 - Foto do interior do forno “flash” de Fortaleza de Minas em operação.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 22 - Forno elétrico de obtenção de matte de níquel a partir da escória do forno “flash”.

Fonte: VOTORANTIM METAIS (2008).

Outro processo pirometalúrgico de recuperação de níquel a partir do concentrado sulfetado é o chamado processo Mond, que consiste na volatilização do matte de níquel com injeção de monóxido de carbono. O gás gerado, chamado de carbonila de níquel e ferro é então condensado e encaminhado à etapa de destilação fracionada onde haverá a separação do ferro e do níquel. Nesta etapa há a geração da carbonila de níquel purificada que será condensada em esferas de níquel, obtendo uma pureza superior a 99,95%. O produto deste processo é o níquel em forma de esferas (figura 23). A reação de formação da carbonila de níquel é demonstrada na equação 2.

(2)

Figura 23 - Esferas de níquel geradas através do processo Mond.

Fonte: NICKEL S-PELLETS (2020).

3.2.1.4 Hidrometalurgia

Os processos hidrometalúrgicos para a recuperação de níquel a partir dos concentrados de minérios sulfetados podem ser baseados em lixiviações em meios sulfúricos, clorídricos ou amoniacais. A estes processos estão associados os processos eletrometalúrgicos de refino do níquel e obtenção do metal de alta pureza (> 99,95%) e processos de redução com hidrogênio a partir das soluções de níquel, obtendo-se o níquel de alta pureza em forma pulverulenta.

A técnica de lixiviação amoniacal sob pressão, também chamado de processo Sheritt Gordon, foi desenvolvida nos anos 50 e as condições dos principais parâmetros de processo da lixiviação são temperatura de 85 °C, pressão de 8 a 10 atm e dissolução em sulfato de amônia. Nestas condições há a lixiviação do níquel, cobalto e cobre. A reação de lixiviação promove a formação de complexos amoniacais, conforme as reações 3 e 4, enquanto o ferro transforma-se na sua fase insolúvel de Fe₂O₃ (SANCHO, VERDEJA e BALLESTER, 2003).

(3)

A amônia presente na solução é volatilizada, enquanto o cobre é precipitado em forma de CuS através da injeção de SO₂. Após a purificação da solução de níquel, há a geração do pó de níquel metálico de alta pureza através da injeção de hidrogênio, conforme a reação 5. Nestas condições há a precipitação de 80 a 90% do níquel mantendo a seletividade com o cobalto contido na solução. O pó de níquel é então encaminhado para uma etapa de briquetagem de onde serão obtidos os briquetes de níquel (SANCHO, VERDEJA e BALLESTER, 2003) (figura 24).

O processo de lixiviação ácida atmosférica foi desenvolvido pela empresa Outokumpu e consiste em uma lixiviação com ácido sulfúrico em um meio agitado com ar, quando o níquel será solubilizado juntamente com o cobre. Ambos os metais são separados por extração por solventes e refinados separadamente por processos eletrolíticos.

Figura 24 - Briquetes de níquel obtidos através da redução de hidrogênio e briquetagem.

Fonte: NICKEL (2020).

O processo em meio clorídrico consiste na dissolução dos mattes de níquel através da adição do gás cloro ou do cloreto de ferro (FeCl₃). Este processo é utilizado pelas empresas Xstrata, na Noruega, especificamente na operação chamada de Nikkelverk, localizada no município de Kristiansand (figura 25) e na planta fabril da empresa francesa Eramet.

Figura 25 - Unidade fabril de Nikkelverk, Noruega.

Fonte: CANNONI (2011).

A lixiviação clorídrica ocorre em autoclaves a temperaturas entre 110 e 130 °C. As principais reações são demonstradas pelas equações 6 e 7 (SANCHO, VERDEJA e BALLESTER, 2003).

Neste processo, a recuperação de níquel a partir do matte apresenta valores superiores a 90%, o cobalto é separado do níquel através de extração por solventes e o ferro é precipitado no momento da injeção do gás cloro (CRUNDWELL, MOATS, *et al.*, 2011).

3.2.1.5 Biolixiviação

A biolixiviação, ou lixiviação bacteriana de minérios sulfetados, utiliza microorganismos que atuam na extração do metal de interesse. A dissolução dos metais por ação de bactérias, pode ocorrer diretamente pelo metabolismo do próprio microorganismo ou indiretamente por algum produto de seu metabolismo. Industrialmente o cobre, zinco e urânio são os metais que mais são

explorados através de rotas de lixiviação bacteriana (MIHOVILOVIC, 2001). A exploração do níquel a partir dessa rota é utilizada apenas em uma operação industrial localizada na Finlândia e chamada de Talvivaara (figura 26).

Figura 26 - Unidade fabril de Talvivaara, Finlândia.

Fonte: Arquivo do autor

Talvivaara aplica a técnica de biolixiviação de extração de metais de minérios, tecnologia esta que foi demonstrada técnica e economicamente viável pela primeira vez através da utilização de pilhas de biolixiviação em escala piloto construídas com o próprio minério de Talvivaara. Esta operação piloto teve início em julho de 2008. O processo de biolixiviação gera calor, devido à reação bacteriana que é exotérmica, por esta razão adequada ao clima sub-ártico da Finlândia Oriental.

O minério é britado em quatro estágios, que é então enviado à etapa de biolixiviação em pilhas. Estas são formadas através dos “*stackers reclaimers*” e possuem as dimensões de 800 m de largura x 2,4 Km de comprimento e 8 m de altura. O processo de biolixiviação dura em torno de 18 meses nesta fase. As pilhas de biolixiviação (figura 27), possuem uma matriz de bentonita capaz de suportar a montagem de mais pilhas por cima das existentes, atingindo alturas superiores a 15 m. Os esquemas dos processos de biolixiviação e de lixiviação em pilhas são demonstrados nas figuras 28 e 29 respectivamente. Após a biolixiviação na primeira fase, a pilha é desmontada e remontada em uma nova pilha, para que o processo de biolixiviação recupere uma maior quantidade de níquel e os outros metais de interesse. Nesta segunda etapa, o processo dura cerca de 2 anos.

Figura 27 - Pilhas de biolixiviação de Talvivaara.

Fonte: Arquivo do autor

Durante o processo de biolixiviação em pilhas, há a injeção de ar por debaixo destas através de compressores dispostos por diversos pontos da pilha. O ar é alimentado através de dutos de PEAD (polietileno de alta densidade), localizados em pontos estratégicos garantindo uma injeção de ar homogênea por toda a pilha. O ar é crucial para a biolixiviação de alto rendimento de recuperação metálica, pois o oxigênio contido é quem promove a respiração bacteriana e consequentemente a ação deste microorganismo na reação de biolixiviação.

No processo de biolixiviação há a conversão dos sulfetos através da ação bacteriana, liberando os metais e gerando calor, pois a reação é exotérmica. Dependendo do tipo de bactéria o processo pode atingir até 90°C. Na tabela 7 são apresentadas algumas bactérias encontradas no minério de Talvivaara assim como sua classificação e algumas características. Neste processo a bactéria oxida o íon Fe^{2+} e o enxofre (S), produzindo Fe^{3+} e SO_4^{2-} .

Figura 28 - Esquema de operação da biolixiviação em pilhas de Talvivaara.

Fonte: NURMI (2011).

Figura 29 - Esquema do processo de biolixiviação em pilhas.

Fonte: NURMI (2011).

Tabela 7 - Principais bactérias encontradas no minério de Talvivaara.

Bactéria	Oxidação	Temperatura (°C)	pH ótimo	Classificação
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	Fe,S	31	1,8 - 2,0	Mesófilas
<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>	S	28-30	2,0 - 3,5	
<i>Leptospirillum ferrooxidans</i>	Fe	30-37	1,6 - 2,0	
<i>Leptospirillum ferriphilum</i>	Fe	30-37	1,4 - 1,8	
<i>Acidithiobacillus caldus</i>	S	45	2,0 - 2,5	Termófilas
<i>Acidimicrobium ferrooxidans</i>	Fe	45-50	2,0	
<i>Leptospirillum thermoferrooxidans</i>	Fe	45-50	1,7 - 1,9	
<i>Sulfobacillus acidophilus</i>	Fe,S	45-50	2,0	
<i>Sulfobacillus thermosulfidooxidans</i>	Fe,S	45-48	2,0	Mesófilas
<i>Ferroplasma acidiphilum</i>	Fe	35	1,7	
<i>Sulfolobus metallicus</i>	Fe,S	65	1,3-1,7	
<i>Metallosphaera sedula</i>	Fe,S	75	2,0	Termófilas
<i>Acidianus brierleyi</i>	Fe,S	70	1,5 - 2,0	
<i>Acidianus infernus</i>	S	90	2,0	

Fonte: NURMI (2011).

3.2.2 Processos de extração a partir dos minérios lateríticos

Os minérios lateríticos de níquel são utilizados para a obtenção de níquel através de rotas hidrometalúrgica e pirometalúrgica. Os processos hidrometalúrgicos mais utilizados são a lixiviação ácida sob pressão, lixiviação em pilhas e o processo Caron. Os processos pirometalúrgicos são utilizados para a obtenção de ferroníquel (MANO, 2013) e NPI (“*Nickel Pig Iron*”).

A definição da rota a ser utilizada para a exploração do níquel a partir dos minérios lateríticos depende do tipo de minério laterítico que a reserva possui (figura 30). Caso o minério a ser utilizado seja do tipo limonítico, as rotas utilizadas são as hidrometalúrgicas, enquanto para os minérios lateríticos saprolíticos, rotas pirometalúrgicas serão aplicadas. Alguns estudos indicam que o processo de lixiviação em pilhas pode ser utilizado para ambos os minérios (limoníticos e saprolíticos) (OXLEY, SMITH e CACERES, 2016).

Figura 30 - Definição dos processos de extração de acordo com o minério laterítico.

Fonte: OXLEY, SMITH e CACERES (2016).

O diagrama ternário apresentado na figura 31 mostra a adaptabilidade dos processos e produtos à composição química dos minérios lateríticos. Se o teor de magnésio é alto, a obtenção de ferroníquel deve ser descartada, pois será necessário escorificar todo o magnésio, gerando grandes volumes de escória e aumentando o consumo energético, o que também vale a mesma consideração quando o minério apresentar teores altos de sílica. Nestes casos, os minérios deverão ser processados pelos processos Caron, lixiviação ácida ou lixiviação em pilhas. Já os minérios localizados na faixa central são adequados ao processo RKEF (RICHTER, 2009).

Figura 31 - Diagrama de fases do sistema SiO_2 – MgO – FeO dos minérios lateríticos.

Fonte: Arthur Pinto Chaves (comunicação pessoal)

No Brasil há diversas reservas de minérios lateríticos de níquel e as principais são as minas de Niquelândia e Barro Alto, em Goiás, pertencentes ao Grupo Votorantim e Anglo American, respectivamente, e Onça Puma, no Pará, operada pela Vale.

Os minérios lateríticos apresentam uma mineralogia complexa e o níquel geralmente encontra-se nas inclusões ultrafinas, com isso os teores de níquel nos minérios lateríticos são baixos. Os processos de beneficiamento para atingirem-se maiores teores são raros na indústria e quando são utilizados, apresentam baixas eficiências como é o caso da operação de New South Wales, na Austrália, que utilizam processos de separação gravítica em conjunto com processos de separação magnética. O teor de níquel no minério laterítico é de 0,9% e após o processo de concentração o teor de níquel passa a ser de 1,1% (FARROKHPAY, FILIPPOV e FORNASIERO, 2019).

3.2.2.1 Pirometalurgia

3.2.2.1.1 Ferroníquel

Os processos pirometalúrgicos de obtenção de ferroníquel a partir do minério laterítico de níquel consistem basicamente nas etapas de secagem do minério, calcinação, redução, refino e granulação. A primeira operação industrial a utilizar esse processo, iniciou sua produção em 1910, na Nova Caledônia e até os dias de hoje continuam em operação. Esta empresa se chama Doniambo (figura 32) e pertence ao grupo francês Eramet.

Figura 32 - Forno rotativo de calcinação de Doniambo, Nova Caledônia

Fonte: CANNONI (2010).

Do pátio de estocagem o minério é então enviado aos fornos de pré-secagem com uma capacidade de 200 t/h. Esta etapa do processo tem o objetivo de reduzir a umidade do minério de 35% para menos que 20% a fim de utilizar menor quantidade de energia elétrica para a redução, além de anular a crepitação do minério dentro do forno. Nesta etapa há dois pré-secadores. Após a pré-secagem o minério é então calcinado nos cinco fornos rotativos que medem 95 metros de comprimento e 4 metros de diâmetro, por um tempo de residência de aproximadamente 90 minutos. Estes fornos operam com uma rotação de 2 rpm e com uma capacidade instalada de calcinação de 95 t de minério / hora. No interior dos fornos rotativos, o minério é exposto a uma chama movendo-se em direção contrária a esta. O objetivo da operação de calcinação é elevar ao máximo possível a temperatura do minério (acima de 900°C) sem que sofra fusão para que seja encaminhado aos fornos elétricos. Esta operação elimina toda a água remanescente no minério, inclusive a água da estrutura dos minerais. O minério na entrada do forno possui teor médio de níquel variando entre 2,5 a 3,0%. Uma vez calcinado, o minério é enviado aos 3 fornos Demag onde ocorre a etapa de redução a uma temperatura de aproximadamente 1.600°C. Do metal gerado nos fornos Demag, 80% é enviado às etapas de remoção de silício através da injeção de oxigênio e reaquecimento, formando sílica (SiO_2), que é removida pela escória. Após esse processo o metal é encaminhado à etapa de dessulfuração através das adições de cal e latas de alumínio recicladas, reduzindo a temperatura do metal líquido. As emissões de SO_2 geradas neste processo são capturadas, resfriadas e enviadas à planta de produção de ácido sulfúrico. O ferroníquel produzido é então granulado formando o produto denominado SLN 25 (25 mm) e enviados aos clientes de aço inoxidável (CANNONI, 2010).

Além do níquel, há nos minérios lateríticos a presença de cobre, cobalto e ferro, então as principais reações que correm na etapa de redução são apresentadas pelas equações 8, 9, 10, 11 e 12. (RICHTER, 2009):

No forno elétrico o material oriundo da etapa de calcinação sofre o processo de redução e por ação do grande gradiente térmico gera um movimento na carga líquida no interior do forno. Com isso, SiO₂, MgO, FeO e Al₂O₃, formam a escória e, como é menos densa que o metal, permanece sobrenadante ao ferroníquel líquido, que além de Fe e Ni possui em sua composição Cu e Co. Os principais fatores que influenciam a operação do forno são a temperatura, metalização e perda ao fogo do calcinado, sistema de carregamento e monitoramento do nível da carga, razão entre potência do banho e do arco, carga específica do leito, fornecimento de energia e sistema de resfriamento da carcaça (RICHTER, 2009).

3.2.2.1.2 Gusa níquelífero

O outro produto obtido através do processo pirometalúrgico de exploração do níquel a partir de minérios lateríticos, é gusa níquelífero ou “*Nickel Pig Iron*”, ou ainda NPI. O processo de obtenção de NPI foi desenvolvido nos anos 60, mas somente em 2005 teve o início da operação em escala industrial. As primeiras empresas a produzirem o NPI foram os produtores de gusa chineses, que utilizavam os próprios altos fornos existentes, alterando apenas o minério de alimentação, ou seja, ao invés de minério de ferro, alimentavam o alto forno com minério laterítico de níquel. O produto obtido era gusa contaminado com níquel e passou a ser chamado de “*Nickel Pig Iron*”. Houve uma grande evolução tecnológica nos processos de obtenção de NPI, como o

início de sua exploração através dos altos fornos, passando para a rota RKEF. Novos processos de obtenção vêm sendo desenvolvidos como a adaptação do já existente processo Krupp-Renn e atualmente o desenvolvimento do processo que utiliza uma etapa de redução em baixas temperaturas e posteriormente uma separação magnética (YILDIRIM, MORCALI, *et al.*, 2013) e (RAO, LI, *et al.*, 2013).

Os principais produtores de NPI da China são apresentados na tabela 8, assim como a localização na China, o processo que utiliza e a capacidade de produção. Nesta tabela verificamos que o processo mais utilizado é o RKEF, representando cerca de 89% da produção total de NPI na China, enquanto o processo utilizando Alto forno representa apenas 11% do total. Além da China, outro produtor de NPI é a Indonésia, sendo representada por apenas uma empresa, a PT Indoferro, com capacidade de produção de 16.000 tNi /ano, contido em NPI (INDOFERRO, 2010). Desde 2005, empresas particulares nas províncias chinesas de Jiangsu, Zhejiang e Shandong adaptaram alguns altos-fornos de escala reduzida para a produção de NPI, reduzindo a escassez do suprimento de níquel. Estes altos-fornos foram desativados em 2007, de acordo com a política nacional chinesa de eficiência energética. No final de 2007, havia mais de 300 plantas produzindo NPI, tendo a capacidade de produção passando de algumas centenas de toneladas em 2005 para alguns milhares de toneladas em 2007 (RAO, LI, *et al.*, 2013).

Tabela 8 - Principais produtores de NPI da China.

<i>Empresa</i>	<i>Localização (Província)</i>	<i>Processo</i>	<i>Capacidade (t Ni/ano)</i>
<i>Jien Nickel</i>	<i>Inner Mongolia</i>	<i>RKEF</i>	<i>100.000</i>
<i>Macrolink Group</i>	<i>Guangxi</i>	<i>RKEF</i>	<i>50.000</i>
<i>Sichuan Jinguang Group</i>	<i>Guangxi</i>	<i>RKEF</i>	<i>50.000</i>
<i>Guangxin Holding Group</i>	<i>Guangdong</i>	<i>RKEF</i>	<i>50.000</i>
<i>Fujian Fufeng</i>	<i>Fujian</i>	<i>RKEF</i>	<i>50.000</i>
<i>Shandong Haixin</i>	<i>Shandong</i>	<i>Alto forno</i>	<i>30.000</i>
<i>Hanking Group</i>	<i>Liaoning</i>	<i>RKEF</i>	<i>30.000</i>
<i>Hanking Group</i>	<i>Liaoning</i>	<i>RKEF</i>	<i>30.000</i>
<i>Taiwan E-United Group</i>	<i>Fujian</i>	<i>RKEF</i>	<i>30.000</i>
<i>Ruitian Steel</i>	<i>Fujian</i>	<i>RKEF</i>	<i>30.000</i>
<i>Zhanhua Weye Ni Industry</i>	<i>Shandong</i>	<i>RKEK</i>	<i>20.000</i>
<i>Inner Mongolia Shangdu</i>	<i>Inner Mongolia</i>	<i>RKEF</i>	<i>20.000</i>
<i>Fujian Dingxin</i>	<i>Fujian</i>	<i>RKEF</i>	<i>20.000</i>
<i>Delong Nickel Industry</i>	<i>Jiangsu</i>	<i>RKEF</i>	<i>20.000</i>
<i>Anhui Tenghong Alloy</i>	<i>Anhui</i>	<i>RKEF</i>	<i>20.000</i>
<i>Zhanhua Hugo Dragon Metal Limited</i>	<i>Shandong</i>	<i>Alto forno</i>	<i>10.000</i>
<i>Xuzhou Jinxiang Metallurgy</i>	<i>Jiangsu</i>	<i>RKEF</i>	<i>10.000</i>
<i>Shanxi Dakang Group</i>	<i>Shanxi</i>	<i>Alto forno</i>	<i>9.000</i>
<i>Henan Qingpu</i>	<i>Henan</i>	<i>Alto forno</i>	<i>8.000</i>
<i>Zhongbao Binhai Ni Corp.</i>	<i>Hebei</i>	<i>RKEF</i>	<i>8.000</i>
<i>Sinchuan Jinguang Group</i>	<i>Sichuan</i>	<i>RKEF</i>	<i>6.000</i>
<i>Huaibei Xinyuan Ferronickel Smelter</i>	<i>Anhui</i>	<i>RKEF</i>	<i>6.000</i>
<i>Guangxi Xinheli</i>	<i>Guangxi</i>	<i>Alto forno</i>	<i>4.000</i>
<i>Sichuan Jinguang Group</i>	<i>Sichuan</i>	<i>Alto forno</i>	<i>4.000</i>
<i>Fujian Xin'anjiang Ni Alloy</i>	<i>Zhejiang</i>	<i>RKEF</i>	<i>4.000</i>

Fonte: RAO, LI, *et al.* (2013).

a. Alto-forno

A produção de NPI através da redução dos minérios lateríticos de níquel em altos-fornos foi desenvolvida em resposta aos altos preços do níquel, promovendo uma rota mais barata a fim de fornecer NPI como substituto ao níquel eletrolítico e ao ferroníquel. No processo utilizando altos-fornos, as matérias-primas utilizadas são minério de níquel laterítico, coque e outros reagentes. Antes de serem alimentados nos altos-fornos, estas matérias-primas são blendadas nas proporções ideais de processo e então são sinterizadas (figura 33), formando aglomerados, e então alimentadas aos altos-fornos (figura 34). Impurezas e a escória são removidas do metal reduzido e este é, então vazado em lingoteiras (figura 35), para a formação do NPI. Alguns grandes produtores de NPI utilizam processos de granulação ao invés de lingotamento para a produção de NPI.

Figura 33 - Sinterização do minério laterítico.

Fonte: INDOFERRO (2010).

Figura 34 - Alto-forno para a produção de NPI.

Fonte: INDOFERRO (2010).

Figura 35 - Lingotamento do NPI.

Fonte: INDOFERRO (2010).

Os minérios lateríticos de níquel são muito diferentes dos minérios de ferro utilizados na siderurgia em termos de características físico-químicas, causando diversos problemas durante os processos de sinterização e redução. Na sinterização do minério laterítico, a alta umidade contida e os materiais refratários gerados na desidroxilação do silicato de magnésio hidratado impedem a fusão incipiente dos materiais a serem sinterizados, gerando um material aglomerado com baixa qualidade em relação à resistência mecânica, baixa produtividade e alto consumo de coque. Além dessas dificuldades, a alimentação de minérios lateríticos nos altos-fornos causa a geração de escória com alta viscosidade devido à baixa temperatura desta e pela presença de cromita (Cr_2O_3), além do alto consumo de energia. Para mitigar o problema de viscosidade da escória, adiciona-se fluorita ao processo, pois é um agente fluidizador de escória, mas este reagente causa alguns problemas, como a alta taxa de corrosão dos materiais refratários que revestem os fornos e a emissão de gases venenosos. O processo utilizando altos-fornos teve um desenvolvimento a uma velocidade surpreendente na China, entretanto, com a redução do preço do níquel e com o maior rigor das políticas ambientais, a maioria dos altos-fornos foram desativados (RAO, LI, *et al.*, 2013).

b. Processo RKEF

A sigla RKEF (*“Rotary Kiln Electric Furnace”*), ou forno rotativo - forno elétrico, é um processo amplamente empregado na produção de ferroníquel, a partir do minério laterítico saprolítico. O processo RKEF é composto por dois estágios pirometalúrgicos que envolve a calcinação e a redução parcial do minério saprolítico no forno rotativo, seguido de uma redução a alta temperatura no forno elétrico a arco. O produto é um ferroníquel contendo aproximadamente 20% a 40% de Ni. Não é economicamente viável processar minérios lateríticos com altos teores de ferro e baixas concentrações de níquel através deste processo. Este processo foi adaptado para a produção de NPI, pois apresenta custos mais atrativos, comparado ao alto-forno, além de apresentar taxas de recuperação superiores (RAO, LI, *et al.*, 2013). Na figura 36 é apresentado o fluxograma do processo RKEF.

Apesar do processo RKEF ter apresentado uma evolução tecnológica, se comparado ao alto-forno, a pressão por redução de custos operacionais para mitigar o impacto da volatilização severa dos preços do níquel, que ocorreu principalmente nos últimos anos, fez com que os produtores investissem em novas rotas tecnológicas para a obtenção de NPI, como o processo Krupp-Renn e o processo de redução a baixas temperaturas, seguido de separação magnética.

Figura 36 - Fluxograma do processo RKEF.

Fonte: CANNONI (2010).

c. Processo Krupp-Renn

O processo Krupp-Renn foi desenvolvido pelo professor Johannsen, nas Usinas Krupp, entre os anos 1931 e 1939 com o intuito de explorarem os minérios de baixos teores (28 a 33% de ferro e elevado teor de sílica), oriundos da mina localizada na região de Salzgitter, na Alemanha (ARAÚJO, 1997).

Durante a Segunda Guerra Mundial, em 1942, a empresa japonesa Nippon Yakin Kogyo Company construiu uma planta industrial no município de Miyazu para o processamento de minérios lateríticos com baixos teores de níquel, utilizando processo Krupp-Renn. Até o ano de 1952, esta empresa alimentava o processo com minérios de baixos teores oriundos da mina de Oheyama. A partir desse ano, iniciou-se a alimentação do processo com minérios provenientes da Nova Caledônia, Indonésia e Filipinas, obtendo-se desta forma ferroníquel, com uma capacidade anual de 12.000 t de níquel (WATANABE, ONO, *et al.*, 1987). O minério laterítico saprolítico importado da Nova Caledônia, Indonésia e Filipinas é britado e seco, logo depois misturado com carvão e calcário moídos para a aglomeração (briquetagem), que são aquecidos e reduzidos e em seguida alimentados continuamente em um forno rotativo.

O briquete já reduzido é então resfriado rapidamente em água, britado e magneticamente separado. Este processo possui algumas vantagens na produção do NPI, como o baixo consumo energético necessário para a produção de NPI, sendo 90% da energia necessária é gerada pelo carvão e o consumo deste insumo no processo Krupp-Renn é de aproximadamente 140 kg/t de minério laterítico, não é necessário o consumo de coque metalúrgico e há a geração de um NPI com boa qualidade química. Na figura 38 é demonstrada a curva de temperatura e as condições de redução no interior do forno rotativo. Dentro deste forno há três zonas reconhecidas, preaquecimento ou zona de secagem, zona de redução e zona de formação de anel (*"luppen zone"*). Na zona de pré-aquecimento ou zona de secagem, a mistura de minério laterítico, combustível e calcário é aquecida e secada por gases recirculados da queima dos materiais redutores. Após um pré-aquecimento adequado da carga, o ferro e os óxidos de níquel são convertidos na zona de redução a partículas de ferroníquel, as quais se mantêm dispersas em uma ganga viscosa (ARAÚJO, 1997) e (WATANABE, ONO, *et al.*, 1987). Na figura 37 é apresentado o fluxograma do processo Krupp-Renn. Quando a carga atinge a zona de

aglomeração, a redução está praticamente completa e somente uma pequena quantidade de CO é liberada. O ar e os gases de aquecimento oxidantes introduzidos do final da descarga do forno entram em contato com a superfície da carga, ocasionando uma reoxidação muito forte do ferro exposto, resultando em uma elevação da temperatura e a formação de uma escória ferrosa. No processo Krupp-Renn, o minério laterítico é reduzido a um estado semi-fundido através de um forno rotativo de 4,2 m de diâmetro e 70 m de comprimento. Uma temperatura suficientemente alta (1.400°C) na zona de aglomeração é necessária para que a fusão incompleta da carga permita que as partículas de feroníquel sofram um processo de coalescimento (RAO, LI, *et al.*, 2013). O controle de temperatura é crítico, pois se apresentarem-se elevadas podem formar o que chamam de anéis do forno rotativo. Geralmente o anel de escória forma-se a 30 m da área de descarga do forno rotativo e o anel metálico forma-se a 8 m da área de descarga do forno. Ambos os anéis são formados no interior do forno rotativo e causam diversos problemas operacionais. O anel de escória na zona de redução pode aumentar o consumo de combustível e prejudica a passagem de ar no interior do forno, resultando em uma ineficiente movimentação da carga no forno e uma redução insuficiente do ferro e dos óxidos de níquel. A formação desses anéis reduz a movimentação da carga no interior do forno e pode até paralisar este processo, causando sérios danos ao forno e reduzindo sua capacidade de produção. A formação do anel metálico reduzirá o fluxo do material aglomerado e reduzirá o volume do forno rotativo, ocasionando dificuldades para o descarregamento do forno. As empresas chinesas que utilizavam este processo tiveram suas operações paralisadas, pois a formação dos anéis de escória e de metal inviabilizaram a continuidade de suas operações (WATANABE, ONO, *et al.*, 1987) e (RAO, LI, *et al.*, 2013). Na tabela 9 são demonstradas as comparações existentes entre os processos de produção de NPI, alto-forno, RKEF e Krupp-Renn.

Figura 37 - Fluxograma do processo Krupp-Renn.

Fonte: RAO, LI, *et al.* (2013).

Figura 38 - Curvas de temperatura e comportamento da redução no forno rotativo.

Fonte: RAO, LI, *et al.* (2013).

Tabela 9 - Comparação entre os processos Alto-forno, RKEF e Krupp-Renn.

Processo	Especificações da alimentação	Produto	Operação	Vantagens
Alto-forno	Minérios limoníticos (Fe>35% e Ni≤1%)	NPI (2 a 5% Ni e recuperação de Ni ≥ 80%)	Aglomerada das matérias-primas e redução em alto-forno a 1.500°C	Sem necessidade de altos investimentos pois bastam adaptações para a operação de obtenção de NPI e alta capacidade de produção.
RKEF	Minérios saprolíticos (Ni>2%, SiO ₂ /MgO entre 2 e 2,5)	FeNi ou NPI (15 a 25% Ni e recuperação de Ni > 90%)	Pré-redução do minério a temperaturas entre 850 e 1000°C em forno rotativo e redução a temperaturas entre 1250 e 1400 °C em fornos elétricos.	Fluxograma de processo simples e já conhecido, altas recuperações de Ni e resíduo gerado de fácil gerenciamento.
Krupp-Renn	Minérios saprolíticos (Ni>2%, SiO ₂ /MgO entre 2 e 2,5)	FeNi ou NPI (23% Ni e recuperação de Ni ≥ 90%)	Redução do minério a temperaturas entre 900 e 1250 °C e fusão a temperaturas entre 1250 e 1400 °C em fornos rotativos.	Baixo consumo de energia, coque não é a principal fonte de energia, não há a necessidade de energia elétrica e utilização do resíduo como material de construção.

Fonte: RAO, LI, *et al.* (2013).

d. Redução a baixas temperaturas seguida de separação magnética

Os processos de produção de NPI através de Alto-forno e RKEF consistem basicamente na mistura dos minérios lateríticos com a carga, sinterizados ou pré-reduzidos, sendo então encaminhados aos processos de redução a temperaturas variando entre 1.500 e 1.600°C para que haja a separação do ferroníquel ou NPI da escória rica em sílica e magnésia. Pelas altas temperaturas empregadas estes processos são considerados de energia intensiva, principalmente

quando são processados minérios de níquel de baixos teores, pois as concentrações de ferroníquel ou NPI presentes nesta matéria-prima são muito reduzidas e a geração de escória é muito grande. O processo RKEF é inviável quando o minério apresentar concentrações de níquel inferiores a 1,5%, então mais de 50% das reservas conhecidas de minérios lateríticos no mundo não podem utilizar este processo para a produção de ferroníquel ou NPI, pois apresentam concentrações médias de 1,45%. Outro empecilho para a aplicação do processo RKEF é que a grande maioria das reservas de minérios lateríticos localizam-se em locais remotos, dificultando o transporte de insumos e principalmente a dificuldade ao acesso à energia necessária (WATANABE, ONO, *et al.*, 1987), (ARAÚJO, 1997) e (RAO, LI, *et al.*, 2013). O processo Krupp-Renn, apesar de utilizar baixo consumo de energéticos, se comparado ao processo RKEF, necessita de um grande volume de coque para que a redução ocorra no interior do forno rotativo onde temperaturas entre 1.200 e 1.400°C são aplicadas, tornando este processo inviável (ARAÚJO, 1997) e (RAO, LI, *et al.*, 2013).

Um novo método de processamento de minérios lateríticos tem sido desenvolvido a fim de viabilizar economicamente a recuperação do ferroníquel ou NPI destes minérios que apresentam concentrações de níquel inferiores a 1,5%. Esta nova rota tecnológica consiste em uma redução seletiva de óxidos dos minérios lateríticos seguidos de um beneficiamento por separação magnética. Muitas pesquisas foram realizadas para a obtenção de ferroníquel ou NPI através de processos de redução a baixas temperaturas dos minérios lateríticos niquelíferos, seguidos de separação magnética, mas há poucos exemplos de aplicações comerciais. O principal parâmetro a ser desenvolvido no processo de redução a baixas temperaturas é realizar uma redução seletiva do óxido de níquel presente no minério com uma redução limitada do óxido de ferro. Neste processo a completa redução dos óxidos de ferro deve ser evitada. Havendo uma redução reduzida dos óxidos de ferro, este atua como um “carregador” de níquel, gerando o ferroníquel ou NPI, que são separados facilmente do minério que não sofreu redução, através do processo de separação magnética, já que o ferro metálico apresenta alto poder magnético (RAO, LI, *et al.*, 2013)

Teoricamente, a temperatura e a atmosfera redutora deveriam ser suficientes para reduzir todo o óxido de níquel e uma pequena porção do óxido de ferro, produzindo um ferroníquel com alto teor de níquel. A atmosfera redutora contendo CO e CO₂ com uma razão entre os limites críticos, pode-se obter uma redução seletiva do óxido de níquel com a presença de Fe₃O₄ ou FeO, possivelmente alcançado através de uma perspectiva termodinâmica apresentada na figura 39.

Figura 39 - Relação entre temperatura e composição do gás de equilíbrio.

Fonte: RAO, LI, *et al.* (2013).

Além da desejada redução do níquel, também há a redução do óxido de ferro em pequenas proporções. A redução da hematita a magnetita (reação 13), ocorre a um potencial de redução mais baixo do que o do óxido de níquel (reação 14).

Sob temperaturas mais elevadas, a redução da magnetita a wustita (reação 15), também é possível.

Nos minérios lateríticos, tanto o níquel quanto o ferro são encontrados na estrutura da serpentinita, como um substituto do magnésio, tornando seu processo de redução muito mais difícil. O maior desafio da redução do minério saprolítico é garantir que o níquel esteja em uma forma que possa sofrer o processo de redução. O níquel existe em diversas formas diferentes

como nas olivinas $(Mg,Fe,Ni)_2SiO_4$ e piroxeno $(Mg,Fe,Ni)SiO_3$. Durante o processo de redução, a serpentinita sofrerá uma reação de dehidroxilação e as novas fases formadas serão essenciais para a redução do níquel e para a cinética das reações (RAO, LI, *et al.*, 2013). Nos minérios saprolíticos há a formação da forsterita e da enstatita através da reação 16.

Da perspectiva termodinâmica mencionada anteriormente, a formação do níquel metálico a partir do NiO é possível a um potencial de redução extremamente baixo, mas a partir das olivinas são necessários potenciais de redução muito fortes. A fim de se favorecer a coalescência das partículas metálicas em grânulos de ferroníquel ou NPI, adicionam-se alguns reagentes que favorecerão este tipo de fenômeno. Na tabela 10 são demonstrados os tipos de reagentes e seus benefícios, além do comparativo com e sem aditivos. Muitos materiais à base de enxofre como a pirrotita, sulfato de sódio, sulfato de cálcio e enxofre elementar contido no óleo combustível são aptos a favorecerem a redução dos minérios lateríticos e a coalescência das partículas de ferroníquel. Após a separação magnética, melhorias na concentração de níquel e nas recuperações são observadas através da adição de diversos agentes redutores correlacionando-os com diversos intervalos de temperaturas de redução. Aparentemente, a baixas temperaturas de redução, a metalização e a separação do níquel podem ocorrer, particularmente quando há a adição de sulfato de sódio. Verifica-se que o sulfato de sódio pode ser utilizado para intensificar a redução do níquel e do ferro, pois permite maior liberação de ambos os metais dos silicatos. Além disso o sulfato de sódio pode gerar um ponto eutético de um sistema binário Fe-S, que permite acelerar a transferência de massa de íons metálicos e facilitar a coalescência das partículas de ferroníquel durante a redução dos minérios lateríticos. A distribuição da troilita e do ferroníquel são demonstrados na figura 40, indicando que o ferroníquel está encapsulado pela troilita devido à precipitação do ferroníquel na troilita proveniente do Fe-S fundido. A fase líquida (fundida) é responsável pelo rápido engrossamento das partículas, onde pequenas partículas formarão uma solução e precipitarão em partículas maiores, aumentando a taxa de transferência de massa como líquidos difusos muito mais rapidamente do que em sólidos (RAO, LI, *et al.*, 2013).

Figura 40 - Relação entre a ocorrência de FeNi e grãos de FeS após a solidificação com sulfato de sódio.

Fonte: RAO, LI, *et al.* (2013).

Tabela 10 - Efeito dos aditivos na coalescência das partículas de ferroníquel e na separação magnética.

Alimentação				Condições de Redução				Minério	Concentrado Magnético	
Ni	Fe	MgO	SiO ₂	Temperatura (°C)	Tempo de residência (min)	Aditivos	Redutores	Tamanho da partícula de FeNi (μm)	[Ni] (%)	Recuperação de Ni (%)
1,63	33,8	12,00	16,4	1.295	20	1% S, 2% CaCO ₃ , 6% óleo combustível	Óleo combustível	>5	14,4	92,8
0,77	40,2	0,67	16,1	1.000	300	5% FeS	CO 70%, CO ₂ 30%	>5	12	92
1,91	22,1	13,4	26,5	1.000	60	20% Na ₂ SO ₄	Lignita	10 a 50	2 a 9	57 a 83
1,38	25,2	14,99	19,1	800	220	20% Na ₂ SO ₄	H ₂ 70% N ₂ 30%	20 a 40	5,6	83
1,42	23,2	17,65	27,7	1.100	60	6% CaSO ₄	Grafite	5 a 16	2,8 a 5,9	> 95
1,49	34,7	12,28	20,1	1.200	50	10% Na ₂ S ou 10% Na ₂ SO ₄	Betume	5 a 10	3,7 a 10,8	88 a 93

Fonte: RAO, LI, *et al.*, 2013

Avaliando-se o efeito do enxofre elementar, os mecanismos que podem ocorrer são demonstrados a seguir:

- Enxofre reduz a tensão superficial do ferroníquel metálico permitindo aglomerações das partículas;
- Enxofre auxilia na supressão da fase forsterita, permitindo ao níquel reduzir em diversas fases.

3.2.2.2 Hidrometalurgia

Os processos hidrometalúrgicos ácidos de recuperação de níquel contido nos minérios lateríticos, são aplicados aos minérios limoníticos, que possuem altas concentrações de ferro e baixos teores de óxido de magnésio (MgO). Estes minérios são lixiviados a altas temperaturas com ácido sulfúrico através do processo chamado HPAL (*“High Pressure Acid Leaching”*). Neste processo o ferro é precipitado a partir da solução de hematita (CRUNDWELL, MOATS, *et al.*, 2011). O fluxograma do processo HPAL é apresentado na figura 41.

A etapa de lixiviação ocorre principalmente em equipamentos chamados de autoclaves, a temperaturas de 250 °C e pressão de 40 bar. A polpa resultante da lixiviação é enviada à etapa de neutralização onde haverá a remoção das principais impurezas como alumínio, cromo, cobre, ferro, magnésio, manganês e zinco. A neutralização ocorre através da injeção de H₂S na solução. Após a purificação, a solução com baixos teores de impurezas é encaminhada a uma segunda autoclave onde haverá a injeção de H₂S a uma pressão de 5 a 7 bar, fazendo com que precipite o sulfeto de níquel e cobalto de alta pureza. Este precipitado é então encaminhado para a etapa de refino, onde o níquel e o cobalto serão obtidos separadamente e com alta pureza (SANCHO, VERDEJA e BALLESTER, 2003) (CRUNDWELL, MOATS, *et al.*, 2011).

Outros processos de lixiviação sob pressão são aplicados industrialmente como o chamado EPAL (*“Enhanced Pressure Acid Leaching”*), que consiste em processar os minérios limoníticos e saprolíticos na mesma operação e em lixiviações distintas em sistemas em paralelo. Neste processo o minério limonítico é lixiviado em autoclaves (figura 42), enquanto o minério saprolítico é lixiviado em pressão atmosférica à temperatura de 100 °C. Este processo é aplicado na operação industrial de Ravensthorpe, na Austrália.

Figura 41 - Autoclave para a lixiviação do minério limonítico de Ravensthorpe.

Fonte: CANNONI (2012).

Figura 42 - Fluxograma do processo HPAL.

Fonte: CRUNDWELL, MOATS, *et al.* (2011).

Além dos processos de lixiviação sob pressão (HPAL) e o processo simultâneo de lixiviação (EPAL), também é utilizado o processo de lixiviação em pilhas para a recuperação do níquel a partir dos minérios lateríticos marginais. A lixiviação em pilhas é um processo muito difundido na obtenção de metais como cobre, urânio e ouro e atualmente diversas empresas estão desenvolvendo este tipo de tecnologia para o processamento de minérios lateríticos de níquel como a empresa European Nickel nos seus projeto Çaldag, na Turquia e o projeto Acoje nas Filipinas e a empresa Brazilian Nickel, no seu projeto Níquel do Piauí e outros, como demonstrado na tabela 11 (OXLEY, SMITH e CACERES, 2016).

Tabela 11 - Principais projetos de lixiviação em pilhas para níquel laterítico.

Projeto	País	Proprietário	Capacidade de Produção (t/ano)
Piauí	Brasil	Brazilian Nickel	22.000
NiWest	Austrália	GME	14.000
Cerro Matoso	Colômbia	BHP Billiton	20.000
Çaldag	Turquia	European Nickel	20.000
BHP	Guatemala	BHP Billiton	79.500
Pearl	Indonésia	BHP Billiton	32.000
Gag Island	Indonésia	BHP Billiton	27.300
Cleopatra	Estados Unidos	RFN	21.500
Acoje	Filipinas	European Nickel	24.500

Fonte: OXLEY, SMITH e CACERES (2016).

Algumas operações industriais já estão aplicando a lixiviação em pilhas para a exploração de níquel a partir dos minérios lateríticos como as operações de Murrin Murrin, na Austrália, onde mais de 1,5 milhões de toneladas de minério já foram processados, com a integração do processo HPAL. Outra operação que aplica a lixiviação em pilhas é Yuanjiang, na China, que até 2014 já tinha produzido 10.000 t de níquel (OXLEY, SMITH e CACERES, 2016).

3.2.2.3 Processo Caron

O processo Caron é aplicado em minérios limoníticos de níquel de alto magnésio e consiste na calcinação redutora deste minério e posterior lixiviação amoniacal, aplicando-se uma solução de $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ (SANCHO, VERDEJA e BALLESTER, 2003). É um processo energeticamente intensivo com baixas recuperações de níquel ($\cong 70\%$) e foi aplicado em diversas operações industriais (CRUNDWELL, MOATS, *et al.*, 2011). Atualmente, as operações que aplicam o processo Caron estão paralisadas, sendo as últimas a finalizarem suas operações foram Yabulu na Austrália, paralisada em 2017 e Niquelândia no Brasil (figura 43), paralisada em 2016. Na tabela 12 são demonstradas as operações que aplicavam o processo Caron para a recuperação do níquel.

Figura 43 - Operação industrial de Niquelândia, Brasil.

Fonte: Arquivo do autor

Tabela 12 - Operações industriais que aplicavam o processo Caron.

Operação Industrial	País	[Ni] no minério (%)	Produtos	Recuperação de Ni (%)	Capacidade de Produção (t Ni/ano)
Niquelândia	Brasil	1,2	Carbonato de níquel e cobalto que era enviada à refinaria de São Miguel Paulista em São Paulo para a obtenção de Ni e Co eletrolíticos	70	23.000
Yabulu	Austrália	1,5	Óxido de Ni sinterizado (90% Ni e 10% O)	80	12.000
Nicaró	Cuba	1,3	Óxido de Ni sinterizado (90% Ni e 10% O)	75	20.000
Punta Gorda	Cuba	1,3	Óxido de Ni sinterizado (90% Ni e 10% O)	75	20.000

Fonte: CRUNDWELL, MOATS, *et al.* (2011).

Na figura 44, é apresentado o fluxograma do processo Caron de Niquelândia.

Figura 44 - Fluxograma do processo Caron da operação de Niquelândia, Brasil.

Fonte: Arquivo do autor

O processo Caron possui duas etapas principais de recuperação do níquel contido nos minérios lateríticos que serão processados, a redução seletiva e a lixiviação amoniacal. Para a redução seletiva, são aplicados os fornos Nichols Herreshoff ou fornos de múltiplos andares ou mesmo fornos de patamares (figura 45).

Figura 45 - Esquema do forno Nichols Herreshoff.

Fonte: KALIVODA, FORTIER, *et al.* (2020).

No processo Caron, a calcinação tem como objetivo a redução seletiva dos cátions dos óxidos e silicatos, sem a redução do ferro para a forma de metais elementares, que posteriormente estarão aptos a serem solubilizados, uma vez que seus óxidos e silicatos são insolúveis em amônia. A reação geral que é desejada nos fornos é a redução do minério oxidado e silicatado por meio de um gás redutor, formando o metal em seu estado fundamental e gases estáveis em seu máximo de oxidação, como a água e CO₂. As reações 16 e 17 representam as principais reações de redução dos fornos de redução. O processo Caron apresenta boa eficácia para o minério oxidado, mas para o minério silicatado os níveis de recuperação são muito baixos, consequentemente, grande parte do níquel contido no rejeito Caron é oriundo do minério silicatado (MANO, 2013).

Os queimadores, que fornecem os gases de redução (CO e H₂) ficam localizados nos andares inferiores do forno, fazendo com que esses gases, gerados na combustão, percorram um caminho ascendente, em contracorrente com o minério, que é alimentado pelo topo do forno e percorre os andares em sentido descendente, garantindo o melhor contato entre gás e minério. Durante esse percurso os gases vão promovendo a redução do minério. Esses gases saem por uma tubulação no topo do forno que leva a um ciclone que faz a pré-separação dos particulados arrastados. Através do teor destes gases redutores presente nessa mistura gasosa, pode-se medir se a atmosfera redutora está atendendo os parâmetros operacionais como o teor de CO₂ de 10-13%, de CO em torno de 3%, de H₂ em torno de 2% e o menor teor possível de O₂. A soma de CO e H₂ deve estar em torno de 5%. A injeção de combustível permite controlar a atmosfera – oxidante, neutra ou redutora em cada um dos patamares.

Um dos principais parâmetros de controle dos fornos de redução é o perfil de temperatura dos andares. Cada andar possui uma temperatura ideal de processo. Nos andares inferiores ocorre a redução do níquel, sendo que no andar 14 é onde ocorre aproximadamente 60% da redução do níquel a Ni⁰. Desta forma o principal parâmetro de controle do forno, além da alimentação de minério, é a temperatura do 14º andar mantendo-se entre 775º e 785º C. A tabela 13 apresenta o perfil térmico do forno de redução de múltiplos andares.

Após a etapa de redução e o níquel em forma metálica, o minério calcinado e reduzido é encaminhado à etapa de lixiviação amoniacal (figura 46), onde entra em contato com a solução de carbonato de amônio com amônia livre. Nesta etapa ocorre a solubilização do níquel, cobalto e cobre e que em contato com o ar atmosférico gera um complexo químico solúvel. As principais

reações da lixiviação amoniacal são demonstradas nas reações 18 a 21. Esta lixiviação é realizada em espessadores operando em regime de CCD (“*conter current decant*”). Estes espessadores são fechados devido às emissões de amônia.

Tabela 13 - Perfil térmico do forno de múltiplos andares.

Andar	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Máxima (°C)
1°	440	470
2°	485	515
4°	680	740
6°	660	720
8°	720	740
10°	740	760
12°	760	770
14°	775	785
16°	760	780

Fonte: Arquivo do autor

Figura 46 - Lixiviação amoniacal de Niquelândia, Brasil.

Fonte: Arquivo do autor

3.2.3 Recuperação de Níquel a partir do Rejeito Caron

Cada operação industrial que aplica o processo Caron possui fluxogramas semelhantes, mas não idênticos. As etapas que são comuns a todas estas plantas fabris são a redução em fornos de patamares e a lixiviação amoniacal seguida do processo de decantação em contracorrente (figura 47), que é uma etapa que necessita de um tempo de residência muito elevado e consequentemente os equipamentos são de grande porte. Dependendo das características do processo de decantação, o material precipitado pode apresentar teores de níquel muito elevados, caracterizando baixos rendimentos da operação e com isso elevadas perdas de níquel. As perdas de níquel nesta etapa podem chegar a 5% do volume de níquel solubilizado (LITTLEJOHN e VAUGHAN, 2013). Como a amônia está presente, os espessadores são totalmente fechados.

Diversos desenvolvimentos foram realizados para a recuperação dos metais de interesse contidos no rejeito oriundo do processo Caron, das diversas operações industriais existentes no mundo, como rotas de concentração dos valores metálicos com o intuito de obtenção de ferro fundido e gusa (CHAVES, MASINI, *et al.*, 2004), beneficiamento térmico (TAKANO, MOURÃO, *et al.*, 2011), de troca iônica (LITTLEJOHN e VAUGHAN, 2013) (BOTELHO JUNIOR, ESPINOSA e DREISINGER, 2018) (ZAINOL e NICOL, 2009), lixiviação com ácidos orgânicos (COTO, GALIZIA, *et al.*, 2008) e biolixiviação (GUERRERO, DOMÍNGUEZ e RAMIREZ, 2006).

Os estudos realizados com o objetivo de concentrar as espécies minerais portadores de ferro atingindo teores adequados à obtenção de ferro fundido ou gusa englobaram processos de separação densitária em campo gravítico e em campo centrífugo e de separação magnética. Os resultados obtidos não foram satisfatórios pois as espécies portadoras dos materiais metálicos estão misturadas e intercrescidas entre si e com as espécies não metálicas.

Outro motivo dos resultados não serem atrativos é que o rejeito Caron é extremamente fino, dificultando seu manuseio e as operações de concentração, além do níquel estar contido tanto nos óxidos de ferro como em silicatos, não apresentando concentração durante os processos de separação. Neste estudo verificou-se que 18% do níquel, 27% do ferro e 19% do cobalto e cobre estão presentes nas amostras geradas no “overflow” do ciclosizer, o que representa uma granulometria inferior a 9 μm , caracterizando como um material com grande dificuldade de concentração (CHAVES, MASINI, *et al.*, 2004).

Os processos desenvolvidos tanto através de resinas de troca iônica, como lixiviação com ácidos orgânicos e biolixiviação possuem em comum a característica de processos hidrometalúrgicos, havendo sempre a necessidade da etapa de lixiviação para a solubilização do níquel e dos outros metais de interesse contidos no rejeito do processo Caron.

Os processos de troca iônica consistem no tratamento de soluções provenientes da etapa de lixiviação, com o intuito de extrair um ou mais compostos, mediante a utilização de resinas sólidas, altamente reticuladas e com íons intercambiáveis (MIHOVILOVIC, 2001). No estudo realizado pela empresa Yabulu, na Austrália, lixiviaram o rejeito do processo Caron através do processo HPAL e à solução resultante aplicaram a resina de troca iônica Lewatit MonoPlus TP 220, produzida pela Lanxess. A recuperação do níquel contido na solução foi de 90%, apresentando boa seletividade em relação aos outros metais, principalmente à principal impureza que é o ferro (LITTLEJOHN e VAUGHAN, 2013).

Figura 47 - Etapa de decantação em contracorrente de Niquelândia, Brasil.

Fonte: Arquivo do autor

Os processos de lixiviação bacteriana ou biolixiviação consistem no aproveitamento da atividade metabólica de diferentes microrganismos para a degradação dos materiais (GUERRERO, DOMÍNGUEZ e RAMIREZ, 2006). Os desenvolvimentos de recuperação de níquel a partir do rejeito do processo Caron, aplicando a lixiviação bacteriana, utilizaram microrganismos (bactérias), em conjunto com ácidos orgânicos (ácidos cítrico e oxálico) ou inorgânicos (ácido sulfúrico). As maiores recuperações de níquel atingiram valores de aproximadamente 100%, quando o rejeito foi adicionado diretamente à cultura de bactérias *Acidithiobacillus thiooxidans* junto ao ácido sulfúrico, mas o tempo de residência para atingir esse valor foi de 7 dias, o que é industrialmente inviável (COTO, GALIZIA, *et al.*, 2008).

Na unidade de Niquelândia foi desenvolvido o processo de beneficiamento térmico para aumentar o teor de níquel no rejeito Caron. Este processo consiste no aquecimento do rejeito, juntamente com outros insumos em forma de pelotas. Estas são levadas a um forno rotativo com atmosfera controlada com temperatura e tempo de residência pré-determinados. Esse aquecimento promove uma transformação de fase do ferro contido, de magnetita (Fe_3O_4) para wustita (FeO), conforme demonstrado no diagrama de fases da figura 48. A wustita é um material não magnético que quando gerado carrega consigo os metais de interesse como níquel, cobre e cobalto, além de uma proporção do ferro. A magnetita permanece magnética, mas sem a presença do níquel, cobalto e cobre. Após o processo térmico, as pelotas aquecidas são encaminhadas para um tanque com água a fim de promover um resfriamento rápido, evitando que a wustita volte a ser magnetita. A partir daí é realizada uma moagem e posteriormente uma separação magnética onde separa-se a magnetita da wustita e conseqüentemente há uma concentração dos metais de interesse, promovendo uma recuperação mais fácil (TAKANO, MOURÃO, *et al.*, 2011).

Foram realizados diversos experimentos através da técnica de beneficiamento térmico “*Thermal Upgrading*”, variando-se a composição da pelota, temperatura e tempo de residência, realizada a separação magnética em diversos campos e gerado amostras magnéticas e não magnéticas. Durante o processo de aquecimento, há um coalescimento do níquel com o ferro no interior da pelota, conforme apresentado na figura 49.

O teor médio de níquel no rejeito Caron de Niquelândia é de 0,5% e após o processamento através do beneficiamento térmico, atingiram-se resultados de 4,3%, ou seja, um enriquecimento de pouco mais de oito vezes, conforme demonstrado na figura 50.

Figura 48 - Diagrama de fases Fe – O.

Fonte: NADOLL e MAUK (2011).

Figura 49 - Microscopia da pelota após aquecimento e resfriamento demonstrando o coalescimento do níquel

Fonte: TAKANO, MOURÃO, *et al.* (2011).

Figura 50 - Resultados da concentração por beneficiamento térmico do rejeito Caron.

Fonte: TAKANO, MOURÃO, *et al.* (2011).

3.2.4 Processo SALT

O processo SALT (*"Starved Acid Leaching Technology"*) foi desenvolvido pela empresa *Search Minerals* com o intuito de explorar os minérios saprolíticos de baixos teores ou os que apresentam com teores de níquel abaixo do *"cut off"* das minas já existentes. Este processo consiste em utilizar uma lixiviação sulfúrica atmosférica com altos teores de sólidos (250 a 300 g/L), permitindo a utilização de equipamentos menores, se comparado, aos processos de lixiviação atmosférica comumente realizados em reatores providos de agitadores mecânicos, que aplicam concentrações de sólidos de aproximadamente 100 g/L (DREISINGER e CLUCAS, 2013). Após a etapa de lixiviação a polpa gerada é neutralizada com um material alcalino, geralmente calcário. Realizada a neutralização, o material sólido é precipitado e a solução contendo níquel e cobalto é recuperada separadamente para a comercialização de ambos os metais. Na figura 51 é apresentado o fluxograma típico do processo SALT para a recuperação dos minérios saprolíticos de baixos teores.

Figura 51 - Fluxograma do processo SALT para a exploração dos minérios saprolíticos de baixos teores.

Fonte: DREISINGER (2016).

Durante o processo de neutralização, a polpa gerada é encaminhada a um sistema de decantação em contracorrente para se obter a máxima eficiência na separação sólido-líquido com a menor perda de níquel e cobalto, que podem ser precipitados por arraste (DREISINGER, 2016).

O processo SALT foi avaliado pela equipe de tecnologia da empresa para a recuperação de níquel e cobalto a partir dos minérios saprolíticos das minas de Niquelândia (Brasil) e Pomalaa (Indonésia). Na tabela 14 são apresentadas as composições químicas dos minérios saprolíticos de Niquelândia e de Pomalaa.

Tabela 14 - Composição química dos minérios de Niquelândia e Pomalaa

Elemento	Ni	Co	SiO ₂	Al	Ca	Cr	Fe	Mg	Mn	Referência
Niquelândia	1,32%	0,02%	43,02%	0,59%	0,61%	0,28%	8,07%	17,18%	0,13%	GOMES, R. A.
Pomalaa	1,33%	0,02%					8,10%	17,20%		DREISINGER, D.

O minério saprolítico de Niquelândia foi alimentado no processo SALT variando-se a concentração de ácido sulfúrico de 150 a 450 kg/t de minério, temperatura de 50 a 80°C e tempo de residência variando de 1 a 48 horas. A extração de níquel variou de 40 a 70% com uma média de 57,88% e com um consumo médio de ácido sulfúrico de 350 kg/t de minério alimentado. Nestas mesmas condições a extração de Co, Fe e Mg foram de 64,66%, 10% e 44,11% respectivamente (DREISINGER e CLUCAS, 2013).

Para o minério saprolítico de Pomalaa, as mesmas condições operacionais foram aplicadas obtendo-se resultados de extração de Ni, Co, Fe e Mg de 57,90%, 65%, 10% e 46,5% respectivamente (DREISINGER, 2016), resultados muito semelhantes aos obtidos com o minério de Niquelândia.

Após a lixiviação, já com o níquel, cobalto e outros metais solubilizados, podem ser aplicados diferentes processos hidrometalúrgicos de purificação e recuperação de níquel e cobalto, para isso deve-se neutralizar a solução proveniente da lixiviação, com a adição de calcário e encaminhar a solução ao circuito de decantação em contracorrente (CCD) que purifica os sólidos lixiviados e recupera a solução contendo os metais de interesse. Esta solução pode ser tratada por etapas de ajuste de pH e oxidação para precipitação do ferro e alumínio da solução. O processo CCD envolve a utilização de equipamentos de grandes proporções e grandes volumes de água. Outro processo que pode ser aplicado é a técnica chamada "*Resin in Pulp*" que envolve o ajuste do pH da solução para a precipitação de ferro e alumínio e logo depois a polpa entra em contato com resinas de troca iônica que, de acordo com o pH, adsorvem o níquel e o cobalto. Após a adsorção, as resinas são eluídas com uma solução de ácido sulfúrico, que após a eluição gera uma solução de sulfato de níquel e cobalto que pode ser precipitada em forma de hidróxidos ou purificada por extração por solventes e posteriormente enviadas aos processo de eletrólise onde serão obtidos os metais eletrolíticos de alta pureza (Ni 99,95% e Co 99,80%).

O elevado teor de magnésio no rejeito de Niquelândia desaconselharia o uso de lixiviação ácida, conforme esquematizado na figura 28. Entretanto, havendo fracassado as tentativas de concentração das espécies portadoras do Co e do Ni por operações de Tratamento de Minérios e havendo também fracassado o esforço de fazê-lo por operações pirometalúrgicas, julgamos de bom alvitre tentá-lo e, se demonstrada a factibilidade técnica, ao final avaliar sua viabilidade econômica.

3.2.5 Lixiviação

Como verificamos anteriormente, todos os processos hidrometalúrgicos de recuperação do níquel a partir dos minérios lateríticos envolvem uma etapa de lixiviação, pois é o processo que irá retirar o níquel do minério em que está contido, permitindo assim sua recuperação. No processo SALT, a etapa de lixiviação é a mais importante, pois é ela que definirá a rota a ser utilizada, inclusive as etapas subsequentes à lixiviação, podendo envolver processos de precipitação, troca iônica, extração por solventes ou o conjunto de todas estas rotas tecnológicas. A lixiviação é o ataque químico de uma determinada matéria-prima com o objetivo de dissolver o metal de

interesse utilizando reagentes ácidos ou básicos, redutores ou oxidantes, complexantes ou a combinação de todos eles (BALLESTER, VERDEJA e SANCHO, 2000).

Termodinamicamente, ao analisar a dissolução de um sólido, há a necessidade de romper a estrutura cristalina do sólido, o que indica a quantidade de energia para que isto ocorra. No processo de lixiviação também verifica-se a separação dos íons, que se hidratam e passam a formar parte da solução, chamada de eletrólito ou PLS (*"Pregnant Leaching Solution"*) (MIHOVILOVIC, 2001).

Os principais fatores que influenciam a eficácia do processo de lixiviação são granulometria das partículas, agitação, temperatura, pressão e pH pois na lixiviação as variáveis que determinam a cinética são o transporte de massa e a reação de dissolução (MOORE, 1990).

As condições em que o processo de dissolução é termodinamicamente favorável são descritas na forma de um diagrama potencial Eh x pH (GUPTA, 2003). Estes diagramas são conhecidos como Diagramas de Pourbaix, pois foram desenvolvidos pelo professor belga Marcel Pourbaix (MIHOVILOVIC, 2001). Estes diagramas são construídos para o equilíbrio à temperatura de 25°C e possuem limitações, mas servem como um bom indicador para a definição do processo (GUPTA, 2003).

Em um sistema aquoso, para potenciais abaixo da reação de evolução do hidrogênio (linha tracejada "a" da figura 52), é esperado que, na presença de uma solução ácida, o níquel seja encontrado dissolvido na forma de íons Ni^{2+} , NiO_2 e Ni^0 , dependendo do potencial Eh aplicado.

Fonte: POURBAIX (1974).

O mesmo ocorre para o cobalto, ferro e magnésio que, nas mesmas condições de potencial Eh, e em soluções ácidas, se encontram solubilizados em suas formas iônicas, conforme demonstrado nos diagramas de Pourbaix das figuras 53, 54 e 55 respectivamente.

Figura 53 - Diagrama de Pourbaix do Co em água a 25°C.

Fonte: POURBAIX (1974).

Figura 54 - Diagrama de Pourbaix do Fe em água a 25°C

Fonte: POURBAIX (1974).

Figura 55 - Diagrama de Pourbaix do Mg em água a 25°C.

Fonte: POURBAIX (1974).

Com base na discussão anterior é possível verificar que a recuperação do níquel contido em minérios ou resíduos é favorável em meio ácido, porém esta condição não é seletiva pois, os outros metais presentes também serão lixiviados.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras utilizadas nos ensaios de extração de níquel e cobalto foram preparadas a partir de um resíduo gerado na cadeia de produção do níquel. Este resíduo, chamado de rejeito Caron, é gerado como um precipitado na etapa de decantação em contracorrente, realizada após a lixiviação amoniacal do minério laterítico reduzido. Além de níquel e cobalto, este rejeito contém grandes quantidades de ferro, magnésio e sílica, elementos que não foram lixiviados pela amônia. Este rejeito, após a decantação, é enviado à barragem de contenção, chamada de Jacuba (figura 56).

Figura 56 - Barragem de rejeitos do Jacuba.

Fonte: Arquivo do autor

Na figura 57 é apresentado o fluxograma geral do método utilizado para o desenvolvimento da rota tecnológica de extração de níquel e cobalto a partir do rejeito Caron, assim como as variáveis estudadas. Primeiramente, foram realizados estudos topográficos para a definição da localização dos furos para a coleta das amostras que foram realizadas por sondagem. Definidos os locais e as amostras coletadas, estas foram secas, homogeneizadas e quarteadas. Em cada amostra foi realizada a análise química para se determinar a variabilidade dos teores de níquel, cobalto, ferro e magnésio distribuídos por toda a barragem de rejeitos. Após as análises químicas, uma fração de cada amostra foi coletada e todas elas juntadas, formando uma única amostra composta. Esta foi homogeneizada e quarteada para a caracterização a fim de determinar a composição química, granulometria e mineralogia desta nova amostra. Esta amostra foi novamente quarteada e lixiviada em diferentes condições de temperatura, concentração de H^+ e tempo de residência, com o intuito de definir as melhores condições para a máxima recuperação de Ni e Co e verificando sua seletividade em relação ao Fe e Mg. Após a lixiviação, a solução resultante foi filtrada e no material líquido obtido foram analisados Ni, Co, Fe e Mg e simultaneamente medindo-se os valores de pH e potencial redox. Com estes resultados determinamos, as eficiências de extração do níquel, cobalto, ferro e magnésio e o nível de seletividade do processo SALT através da razão das eficiências de extração Ni:Co, Ni:Fe, Ni:Mg, Co:Fe e Co:Mg.

Figura 57 - Fluxograma geral do método analisado.

4.1 Preparação das amostras de rejeito Caron

Para a amostragem do rejeito Caron foram utilizados conceitos de amostragem na mineração. Caso o procedimento amostral seja mal planejado e/ou executado, pode levar a uma interpretação errônea do processo a ser desenvolvido (BOLFARINE e BUSSAB, 2015), além de resultar em custos muito altos devido ao nível de esforço que se realiza para amostragem na mineração (CORRÊA, 2018).

4.1.1 Amostragem da Barragem de Rejeitos

Para melhor representatividade do material estudado, foi realizado um trabalho de amostragem da barragem de rejeitos, onde foram realizados 33 furos. Como não há marcos topográficos implantados na área, as coordenadas e cotas foram arbitrárias e partiram de um marco provisório implantado apenas para execução do projeto. Primeiramente, foi locada uma

malha regular com distância entre pontos de 100 metros. Nos pontos locados pela topografia foram realizadas as sondagens de resíduo, conforme demonstrado na figura 58.

Figura 58 - Localização dos furos de sondagem da barragem do Jacuba.

Fonte: CANNONI e FOGGIATTO (2006).

Os furos foram identificados de acordo com o seu direcionamento, ou seja, furos cuja identificação inicia-se com a letra “N” significa que é sentido Norte (“North”), enquanto os furos cuja identificação inicia-se com a letra “E”, significa que o sentido é Leste (“East”). Em cada furo foram coletadas diversas amostras, sendo que o número de amostras coletadas por furo era proporcional à sua profundidade total, contabilizando a partir da superfície até o fundo da barragem, conforme demonstrado na tabela 15. Foram coletadas 482 amostras, totalizando aproximadamente 578 metros de sondagem. O espaçamento entre cada furo foi de 100 m. Em cada amostra foi realizada a análise química e com esse resultado obteve-se a variabilidade dos teores dos elementos por toda a barragem.

Tabela 15 - Número de amostras coletadas por furo sondado na barragem do Jacuba.

Furo	Número de Amostras	Furo	Número de Amostras	Furo	Número de Amostras	Furo	Número de Amostras
N0	5	N9	16	N18	20	E4	8
N1	11	N10	14	N19	20	E5	20
N2	11	N11	15	N20	18	E6	21
N3	13	N12	20	N21	18	E7	20
N4	15	N13	0	N22	15	E8	20
N5	18	N14	20	N23	13	E9	4
N6	18	N15	20	E1	0		
N7	20	N16	19	E2	4		
N8	19	N17	20	E3	7	TOTAL	482

Para a coleta das amostras, foi utilizada a tecnologia “*Direct Push*”, ou cravação contínua, que consiste na inserção percussiva de uma sonda hidráulica (RIYIS, GIACHETI, *et al.*, 2013), da marca Geoprobe, modelo Advance 6600 (figura 59). O amostrador tipo Macro Core tem como característica perfurar com um tubo interno de PVC transparente de 44mm de diâmetro e 1,2m de comprimento, chamado de “*liner*”. Além da agilidade da perfuração, o amostrador permite coletar uma amostra quase indeformada, preservando suas características físicas e químicas, mesmo abaixo do nível piezométrico do aquífero. As sondagens foram paralisadas ao atingir a base da camada de resíduos e o contato com o solo natural. Todos os “*liners*” foram identificados com a numeração, a profundidade de cada coleta e a indicação de topo e base (figura 60). Ao final de cada coleta os equipamentos (hastes e amostradores) foram descontaminados, utilizando sabão neutro e água limpa.

Figura 59 - Operação de amostragem da barragem de rejeitos.

Figura 60 - “Liners” para o armazenamento das amostras coletadas na barragem de rejeitos.

As amostras armazenadas em cada “*liner*” foram identificadas de acordo com a identificação do furo e a seção da profundidade de onde foi coletada, ou seja, uma amostra coletada do furo N0 e da seção da profundidade entre 1,2 e 2,4 m, será identificada como N0-1,2-2,4.

Após a coleta, armazenamento em “*liners*” e identificação, cada das 482 amostras foi caracterizada através dos diversos métodos analíticos. Para isto, inicialmente, as amostras foram secas por 24 horas em estufa a 105°C e moídas em moinho analítico compacto da marca “IKA”, modelo A11 Basic. O material moído foi quarteado em um quarteador tipo “Jones” e as frações obtidas foram caracterizadas, determinando-se a composição química e granulométrica.

Finalizada a caracterização físico-química das 482 amostras, foi retirada uma alíquota de 50% da massa seca de cada amostra e juntadas formando uma amostra composta que posteriormente foi homogeneizada, quarteada em quarteador tipo “Jones” e caracterizada, determinando sua composição química e mineralógica, além da granulometria. Esta amostra foi utilizada nos ensaios de lixiviação ácida.

4.2 Caracterização das amostras

4.2.1 Rejeito Caron

Para a caracterização química das 482 amostras coletadas por toda a barragem de rejeitos e quantificação dos principais elementos foram utilizados os métodos de digestão por quatro ácidos e de fusão com metaborato de lítio. Este método consiste na utilização simultânea de quatro tipos de ácidos, clorídrico (HCl), nítrico (HNO₃), fluorídrico (HF) e perclórico (HClO₄). Este método é conhecido como digestão “quase total” que permite a digestão de compostos sulfetados e silicatados e os materiais refratários são digeridos através da fusão de metaborato de lítio. Após a digestão das amostras, estas foram analisadas por Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES).

Para a determinação da granulometria das amostras, foi utilizado o granulômetro a laser de baixo ângulo no equipamento Malvern Mastersize 2000.

Após a junção de todas as amostras, formando uma amostra composta, esta foi caracterizada novamente utilizando os métodos de Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES), difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura (MEV). As análises de ICP-OES e granulometria a laser foram realizadas nas instalações laboratoriais da própria empresa, enquanto as análises de difração de raios-X e MEV foram realizados no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT), do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

4.2.2 Soluções Líquidas

Todas as soluções geradas nas diversas etapas do desenvolvimento foram analisadas através de Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES).

4.3 Lixiviação

Para os ensaios de lixiviação foram processados aproximadamente 6 kg de rejeito Caron seco, conforme o esquema apresentado na figura 61, seguindo as etapas de lixiviação e filtração estudadas no presente trabalho.

Figura 61 - Esquema dos ensaios de lixiviação e filtração.

Para cada ensaio de lixiviação foram utilizados 100 g de rejeito Caron seco e adicionado em um béquer de 2 L junto com 1L de solução de água e ácido sulfúrico. Este béquer é provido de agitação mecânica, medidores de temperatura, pH e Eh e aquecimento (a). Após os ensaios de lixiviação, a solução resultante é filtrada através do funil Buchner composto pelo funil, papel filtro, kitassato e bomba a vácuo (b). A solução filtrada é armazenada no kitassato e desta é coletada uma alíquota de 10 mL e armazenada em um tubo de ensaio que será encaminhada à análise química, determinando-se assim os teores de níquel, cobalto, ferro e magnésio contidos nesta amostra e com essas informações calcula-se a eficiência de extração de cada metal e consequentemente a seletividade entre eles (c).

As variáveis avaliadas para a lixiviação foram concentração de ácido sulfúrico, temperatura e tempo de residência e os valores utilizados são apresentados na tabela 16.

Tabela 16 - Variáveis avaliadas para os ensaios de lixiviação.

Variável	Unidade	Valores Avaliados
Concentração de Ácido Sulfúrico	g/L	10 / 25 / 50 / 100
Temperatura	°C	50 / 80
Tempo de Residência	horas	1 / 2 / 4 / 8 / 24 / 32 / 48

Definiram-se somente dois valores de temperatura devido à reação de lixiviação do rejeito Caron ser exotérmica atingindo o valor de 50 °C espontaneamente, então este valor foi definido como o mínimo. A temperatura de 80 °C foi definida aleatoriamente e caso utilizássemos temperaturas maiores haveria a necessidade de utilizar-se autoclaves o que representaria em escala industrial custos de instalação e de operação elevados, além dos riscos tecnológicos em relação ao processo em que aplica-se a pressão atmosférica (MCDONALD e WHITTINGTON, 2008). Os parâmetros de tempo de residência foram definidos de acordo com os tempos utilizados industrialmente (1 a 8 horas) e os tempos de residência de 24, 32 e 48 horas seguem a norma NBR 10005:2004, “Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004). Os parâmetros de concentração de ácido sulfúrico foram definidos segundo os desenvolvimentos preliminares da tecnologia SALT (DREISINGER, 2016). Com estas informações planejamos os ensaios de lixiviação de acordo com as informações apresentadas na tabela 17.

Tabela 17 - Planejamento dos ensaios de lixiviação.

Ensaio	[H ₂ SO ₄] (g/L)	Temperatura (°C)	Tempo de Residência (h)
1	10	50	1
2	10	50	2
3	10	50	4
4	10	50	8
5	10	50	24
6	10	50	32
7	10	50	48
8	25	50	1
9	25	50	2
10	25	50	4
11	25	50	8
12	25	50	24
13	25	50	32
14	25	50	48
15	50	50	1
16	50	50	2
17	50	50	4
18	50	50	8
19	50	50	24
20	50	50	32
21	50	50	48
22	100	50	1
23	100	50	2
24	100	50	4
25	100	50	8
26	100	50	24
27	100	50	32
28	100	50	48
29	10	80	1
30	10	80	2
31	10	80	4
32	10	80	8
33	10	80	24
34	10	80	32
35	10	80	48
36	25	80	1
37	25	80	2
38	25	80	4
39	25	80	8
40	25	80	24
41	25	80	32
42	25	80	48
43	50	80	1
44	50	80	2
45	50	80	4
46	50	80	8
47	50	80	24
48	50	80	32
49	50	80	48
50	100	80	1
51	100	80	2
52	100	80	4
53	100	80	8
54	100	80	24
55	100	80	32
56	100	80	48

4.4 Neutralização

O agente neutralizante utilizado nesta etapa do processo foi o calcário calcítico pois é encontrado em abundância no estado de Goiás, onde em 2018 foram produzidos cerca de 5 milhões de toneladas (ABRACAL, 2018), reduzindo os custos operacionais de logística para fornecimento ao processo de extração de níquel e cobalto.

Para a neutralização da solução resultante da lixiviação utilizou-se calcário, elevando-se o pH da solução atingindo valores de aproximadamente 4,0, pois é o valor em que os processos de separação (extração por solventes e resinas de troca iônica) apresentam a maior seletividade entre a extração do níquel e do cobalto em relação ao ferro e magnésio em meio sulfúrico (THOMAS, 2010), como demonstrado na figura 62.

Figura 62 - Eficiência de extração dos metais em meio sulfúrico de acordo com o pH.

Fonte: THOMAS (2010).

Para os ensaios de neutralização foi utilizada a solução resultante do ensaio de lixiviação que apresentou os melhores resultados de extração de níquel e cobalto a partir do rejeito Caron, conforme demonstrado no esquema da figura 63. Em pH 4,0, as extrações de níquel, cobalto, ferro e magnésio são 0%, 71%, 99,9% e 29,5%, respectivamente.

Em cada ensaio foram utilizados béqueres de 2 L providos de aquecimento, agitação mecânica e medidores de pH e temperatura. À solução previamente aquecida, foi adicionado calcário suspenso em água na concentração de 300 g/L. Foi-se adicionando essa solução alcalina de 10 em 10 mL a cada 2 minutos e avaliando a elevação do pH, até atingir o valor de 4,0, determinando assim o tempo de residência e a quantidade necessária de calcário para cada ensaio.

Figura 63 - Esquema dos ensaios de neutralização.

4.5 Extração

Existem diversas técnicas de extração e/ou purificação de soluções oriundas dos processos de lixiviação / neutralização. As principais técnicas utilizadas são extração por solventes, troca iônica, precipitação e cementação. Destas técnicas somente a extração por solventes e a troca iônica permitem, além de purificar, concentrar as soluções no metal de interesse (BALLESTER, VERDEJA e SANCHO, 2000).

A extração por solventes consiste na distribuição de um soluto entre dois líquidos imiscíveis que estão em contato entre si. É utilizada em diversos processos industriais e especificamente na indústria mineral na obtenção de urânio, cobre, níquel e cobalto (RYDBERG, MUSIKAS e CHOPPIN, 1992).

O processo de troca iônica é uma operação onde os íons presentes em resinas sólidas são intercambiáveis com íons presentes na solução de alimentação. É comumente utilizado em processos de purificação de água e nos processos hidrometalúrgicos de recuperação de ouro, onde há a remoção dos íons cálcio e magnésio por íons de sódio. As resinas, com o decorrer do processo de troca iônica, tornam-se saturadas, havendo a necessidade de regenerá-las. Neste momento o processo é paralisado e uma solução ácida entra em contato com as resinas removendo os íons que saturaram as resinas, regenerando-as e tornando-as aptas a serem reutilizadas no processo de troca iônica (WANKAT, 2012).

As operações industriais de extração por solventes e de troca iônica possuem uma característica em comum, que é a necessidade das baixas concentrações de sólidos presentes na solução que alimentará esses processos, havendo a necessidade de diversas etapas de separação sólido / líquido. Neste estudo, após a etapa de neutralização, há a presença de altas concentrações de sólidos, pois a lixiviação estudada foi a saturada em sólidos e na etapa de neutralização houve a necessidade de adicionar calcário, o que elevou mais ainda o teor de sólidos

na solução. Caso tivéssemos avaliado tanto a extração por solventes quanto a troca iônica haveria a necessidade de desenvolvermos um processo de separação sólido / líquido, que implica em altos custos de investimentos e operacionais caso o processo seja aplicado industrialmente. Para evitar a aplicação dessa operação unitária buscou-se uma alternativa que é o processo RIP (*“Resin in Pulp”*).

O processo RIP é amplamente utilizado nas etapas de exploração de ouro como nas operações da Golden Jubilee e Barbrook Gold Mine, na África do Sul, Penjom Gold Mine, na Malásia e Muruntau, no Uzbequistão (ADAMS, 2005). Este processo foi utilizado pela primeira vez nos Estados Unidos com o intuito de tratar polpas com sólidos muito finos e soluções difíceis de clarificar (BALLESTER, VERDEJA e SANCHO, 2000). O processo RIP consiste em utilizar as resinas de troca iônica em contato com polpas oriundas das etapas de lixiviação e/ou neutralização sem a necessidade de realizar um processo de separação sólido / líquido, como utilizado nos processos clássicos de separação (BALLESTER, VERDEJA e SANCHO, 2000).

4.5.1 Escolha da Resina de Troca Iônica

As principais resinas de troca iônica utilizadas nos processos de exploração de níquel e cobalto são apresentadas na tabela 18. Considerando que os metais de interesse são o níquel e o cobalto, e que os principais contaminantes são o ferro e o magnésio, a escolha do extratante teve como critério sua maior seletividade pelo níquel e cobalto em relação ao ferro e magnésio, além de considerarmos os processos subsequentes como a eluição ou estripagem e processos de refino eletrolítico.

As resinas de troca iônica são geralmente caracterizadas pela classe dos compostos que as compõem, como o ácido iminodiacético ($C_4H_7NO_4$) ou IDA e bis-picolilamina ou BPA. Após os processos de troca iônica, as resinas IDA geralmente são carregadas apenas 30 a 50% de sua capacidade com níquel e cobalto, sendo o restante carregadas com impurezas presentes na solução como alumínio, ferro, manganês, cálcio e magnésio. Para a eluição destas resinas utiliza-se uma solução ácida que remove além do níquel e cobalto todas as impurezas, fazendo com que o nível de impurezas na solução gerada aumente, prejudicando os processos de refino do níquel e cobalto (LITTLEJOHN e VAUGHAN, 2012). O outro tipo de classe das resinas de troca iônica utilizado nos processos de separação é a resina do tipo BPA, que foi desenvolvido para a remoção de cobre e níquel da solução de cobalto (GRINSTEAD, 1984). As resinas BPA possuem menor capacidade de remover níquel e cobalto em relação às resinas IDA, mas possuem melhor seletividade em relação às resinas IDA permitindo melhores condições operacionais nos processos subsequentes de refino do níquel e do cobalto (LITTLEJOHN e VAUGHAN, 2012).

Tabela 18 - Principais resinas de troca iônica utilizadas na exploração do Ni e Co.

Nome Comercial	Fabricante	Grupo	Seletividade	Referência
Lewatit TP-220	Lanxess	BPA	Cu > Ni > U > Fe(III) > Zn > Co > Cd > Fe(II)	LANXESS, 2020
Lewatit TP-207	Lanxess	IDA	Cu > V > U > Pb > Ni > Zn > Cd > Co > Fe(II) > Be > Mn > Ca > Mg > Sr > Ba > Na	LANXESS, 2020
Purolite S930	Purolite	IDA	Cu > Ni > Zn > Co > Cd > Fe(II) > Mn > Ca	PUROLITE, 2020
AmberSep M4195	Dupont	IDA	Fe(II) > Cd > Co > Zn > Fe(III) > Ni > Cu	DUPONT, 2020

Com estas informações definimos em utilizar a resina Lewatit Monoplus TP 220, que será referida a partir deste momento como somente TP220, produzida pela Lanxess ION da Alemanha. Esta resina utiliza o grupo funcional bis-picolilamina e uma base de poliestireno com divinilbenzeno. O diâmetro das esferas de resina é de 0,38 mm, variando entre 0,34 e 0,42 mm (LANXESS, 2020). A capacidade de extração das resinas depende da composição da solução e pH, e nos estudos preliminares apresentam resultados de 0,9 a 1,1 mol de carga equivalente por litro de resina (LITTLEJOHN e VAUGHAN, 2012).

A escolha da resina TP220 em relação às outras resinas apresentadas na tabela 15 deveu-se não somente ao fato de ser do grupo BPA, como as resinas Purolite S930 (PUROLITE, 2020), mas também pela seletividade que apresentam em relação às impurezas como na resina AmberSep M4195 (DUPONT, 2020).

4.5.2 Ensaios de Extração

Os ensaios foram realizados em um béquer de 2L provido de agitação mecânica. Para que as resinas não entrassem em contato com o “*impeller*” do agitador mecânico, foi confeccionado um cesto poroso com abertura da malha de 0,35 mm, em aço inoxidável 316L. Este dispositivo foi criado para mitigar a degradação mecânica das resinas. A região entre o cesto de aço inoxidável e a parede do béquer foi preenchida com as resinas TP220 e logo depois a solução proveniente da etapa de neutralização foi adicionada dentro do cesto de aço inoxidável. O aparato foi provido de medidores de pH e temperatura. Os tempos de residência aplicados foram de 1, 2 e 4 horas e os volumes de resinas testados foram correspondentes às diluições de 2, 3 e 5%. O esquema destes ensaios é demonstrado na figura 64. O planejamento dos ensaios de extração é apresentado na tabela 19.

Os parâmetros de tempo de residência e de volume de resina foram definidos de acordo com as experiências realizadas anteriormente utilizando as resinas TP220 para extração de níquel e de cobalto (LITTLEJOHN e VAUGHAN, 2013) e (DREISINGER, 2016).

Figura 64 - Esquema dos ensaios de troca iônica.

Ao béquer de 2L com agitador mecânico e o cesto de aço inoxidável, foram adicionadas as resinas de troca iônica TP220 e a polpa neutralizada (a). Durante esta etapa do processo, o pH foi controlado pois com o tempo o pH da solução tende a ser reduzido pois os metais são adsorvidos pelas resinas e consequentemente o teor de H^+ tende a crescer fazendo com que o pH diminua. Para manter o pH no valor de 4,0, era adicionada solução alcalina de água com soda cáustica (teor de 10 g/L de NaOH). Após o tempo de residência estabelecido, toda a polpa e as resinas foram peneiradas em peneiras de abertura 0,30 mm e lavadas com água, permitindo a passagem da polpa pela peneira e as resinas retidas. Após o peneiramento, as resinas foram armazenadas em um béquer que foi encaminhado à etapa de eluição.

4.5.3 Ensaios de Eluição

Para remover os metais adsorvidos pelas resinas TP220, utilizou-se o processo de eluição, cujo esquema é apresentado na figura 65. O parâmetro de processo variado foi o chamado “bed volume” ou BV, que corresponde ao volume de solução equivalente ao volume do leito de resina adicionada à coluna de vidro (MIHOVILOVIC, 2001). Nestes ensaios foram avaliados os valores de BV de 1, 2, 3, 4 e 5. Foram fixados os valores de tempo de residência (1hora) e a concentração de ácido sulfúrico na solução eluente (150 g/L), que garante a remoção de qualquer metal carregado na resina.

Os parâmetros de “bed volume” foram definidos de acordo com as experiências realizadas anteriormente utilizando as resinas TP220 para extração de níquel e de cobalto (LITTLEJOHN e VAUGHAN, 2013) e (DREISINGER, 2016).

Figura 65 - Esquema dos ensaios de eluição.

Nestes ensaios foi utilizada uma bureta de vidro de 1m de altura provida de uma válvula na sua parte inferior. Nesta mesma bureta foi introduzida na parte inferior uma “cama” de esferas de vidro a fim de garantir boa permeabilidade da solução de eluição e não permitir a passagem das resinas de troca iônica para a válvula evitando assim problemas operacionais durante os ensaios. Após a preparação da coluna, esta foi alimentada com as resinas TP220 (a). Logo depois a bureta com as resinas foi alimentada com a solução ácida de acordo com o planejamento da tabela 19 permanecendo a solução em contato com a resina por uma hora (b). Após este tempo, a válvula foi aberta permitindo a saída da solução que foi armazenada em um béquer e enviada ao laboratório para análises e determinação das melhores condições para a extração dos metais a partir das resinas TP220.

Tabela 19 - Planejamento dos ensaios de extração e eluição.

Ensaio	Extração		Eluição	
	Tempo de Residência (h)	Volume de Resina (%)	Ensaio	BV
1	1	2	10	1
2	2	2	11	2
3	4	2	12	3
4	1	3	13	4
5	2	3	14	5
6	4	3		
7	1	5		
8	2	5		
9	4	5		

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização das amostras

As 482 amostras originais do rejeito, armazenadas nos “liners”, foram acondicionadas em bandejas para secagem, a fim de ser determinada a umidade, granulometria e teores de níquel, cobalto, ferro e magnésio.

5.1.1 Umidade

Na tabela 20 são apresentados os resultados das massas úmida e seca das amostras condicionadas nos “liners”. Para o cálculo da umidade utilizou-se a seguinte fórmula.

$$U_{amostra} = \frac{m_{seca}}{m_{úmida}} * 100$$

Onde:

$U_{amostra}$ = umidade da amostra (%);

m_{seca} = massa da amostra seca (kg);

$m_{úmida}$ = massa da amostra úmida (kg);

Com as informações obtidas e apresentadas na tabela 20, verificamos que sempre as amostras coletadas no fundo da barragem, ou seja, a última amostra de cada furo e representadas em amarelo, apresentam valores totalmente diferentes comparando-se aos outros resultados. Isto deve-se ao fato que no momento da coleta destas amostras, foram removidos parte do solo do fundo da barragem e com isso os valores da massa úmida foram alterados e consequentemente os valores de massa seca e umidade foram alterados, não representando o material contido na bacia de rejeitos e por este motivo estas amostras foram descartadas. Este comportamento também foi verificado na caracterização química destas amostras, que será apresentado posteriormente.

Após o descarte destas amostras, foi realizado um estudo estatístico para a determinação da variabilidade da umidade por toda a barragem. Para este estudo foi utilizado o software Minitab16®, por onde foram determinados os valores de média, mediana, desvio padrão, valores máximo e mínimo e primeiro e terceiro quartis. Também foram confeccionados o histograma e “boxplot” destas informações. Na figura 66 é apresentado o histograma dos valores da umidade, assim como os valores da média e desvio padrão que são 68,09% e 3,438, respectivamente.

Tabela 20 - Resultados das determinações de umidade.

Anoseta	Massa amostra (kg)	Massa seca (kg)	Umidade (%)	Anoseta	Massa amostra (kg)	Massa seca (kg)	Umidade (%)	Anoseta	Massa amostra (kg)	Massa seca (kg)	Umidade (%)	Anoseta	Massa amostra (kg)	Massa seca (kg)	Umidade (%)	Anoseta	Massa amostra (kg)	Massa seca (kg)	Umidade (%)	Anoseta	Massa amostra (kg)	Massa seca (kg)	Umidade (%)	Anoseta	Massa amostra (kg)	Massa seca (kg)	Umidade (%)	Anoseta	Massa amostra (kg)	Massa seca (kg)	Umidade (%)																				
N0-0-1,2	1,026	0,698	68,6	N4-0-1,2	1,638	1,118	68,3	N6-8-4-9,6	1,322	0,982	74,3	N8-8-4-9,6	1,300	0,880	67,7	N10-14-4-15,6	1,478	1,030	69,7	N14-9,6-10,8	1,444	0,990	68,6	N16-12-0-13,1	1,409	0,972	69,0	N18-10-8-12,0	2,934	1,928	65,7	N20-10-8-12,0	1,460	0,992	67,9	N23-0-1,2	1,501	0,889	59,2	E5-7-2-8,4	1,652	1,180	71,4	E7-3,6-4,8	1,482	0,978	66,0	E9-2-4-3,6	1,482	0,974	65,7
N0-1,2-2,4	1,508	1,018	67,5	N4-1,2-2,4	1,314	0,900	68,5	N6-9,6-10,8	1,540	1,106	71,8	N8-9,6-10,8	1,278	0,904	70,7	N10-15,6-16,8	2,044	1,360	66,5	N14-10,8-12,0	2,314	1,578	68,2	N16-13,2-14,1	1,375	0,928	67,5	N18-12,0-13,2	2,882	1,886	65,4	N20-12,0-13,2	1,532	1,014	66,2	N23-1,2-2,4	0,684	0,362	52,9	E5-8-4-9,6	1,520	1,114	73,3	E7-4,8-6,0	1,528	1,072	70,2	E9-3,6-4,8	1,450	0,978	67,4
N0-2-4-3,6	1,440	0,960	66,7	N4-2-4-3,6	1,266	0,860	67,9	N6-10,8-12,0	1,384	0,890	64,3	N8-10,8-12,0	1,358	0,946	69,7	N11-0-1,2	2,028	1,378	67,9	N14-12,0-13,2	2,200	1,502	68,3	N16-14-4-15,1	1,489	1,034	69,4	N18-13,2-14,4	2,938	1,950	66,4	N20-13,2-14,4	1,470	0,978	66,5	N23-2-4-3,6	1,044	0,682	65,3	E5-9,6-10,8	1,558	1,072	68,8	E7-6,0-7,2	1,346	0,952	70,7	E9-4,8-6,0	2,284	1,434	62,8
N0-3,6-4,8	1,490	1,002	67,2	N4-3,6-4,8	1,568	1,112	70,9	N6-12,0-13,2	1,752	1,174	67,0	N8-12,0-13,2	1,270	0,892	70,2	N11-1,2-2,4	1,426	0,978	68,6	N14-13,2-14,4	1,584	1,122	70,8	N16-15,6-16,1	1,254	0,844	67,3	N18-14-4-15,6	2,934	1,960	66,8	N20-14-4-15,6	2,866	1,882	65,7	N23-3,6-4,8	1,430	0,926	0,1	E5-10,8-12,0	1,648	1,208	73,3	E7-7,2-8,4	1,436	0,902	62,8				
N0-4,8-6,0	1,260	0,822	65,2	N4-4,8-6,0	1,282	0,872	68,0	N6-13,2-14,4	1,286	0,814	63,3	N8-13,2-14,4	1,294	0,948	73,3	N11-2-4-3,6	1,967	1,300	66,1	N14-14-4-15,6	1,372	0,930	67,8	N16-16,8-18,1	1,543	1,084	70,3	N18-15,6-16,8	2,970	1,978	66,6	N20-15,6-16,8	2,862	1,892	66,1	N23-4,8-6,0	1,244	0,842	67,7	E5-12,0-13,2	1,612	1,148	71,2	E7-8,4-9,6	1,606	1,142	71,1				
N1-0-1,2	1,799	1,260	70,1	N4-6,0-7,2	1,566	1,148	73,3	N6-14-4-15,6	1,344	0,922	68,6	N8-14-4-15,6	0,976	0,732	75,0	N11-3,6-4,8	1,496	1,004	67,1	N14-15,6-16,8	1,688	1,184	70,1	N16-18,0-19,1	1,379	0,950	68,9	N18-16,8-18,0	3,006	2,026	67,4	N20-16,8-18,0	2,820	1,892	67,1	N23-6,0-7,2	2,706	1,762	65,1	E5-13,2-14,4	1,584	1,100	69,4	E7-9,6-10,8	1,574	1,098	69,8				
N1-1,2-2,4	2,769	1,922	69,4	N4-7,2-8,4	1,450	1,028	70,9	N6-15,6-16,8	1,398	0,944	67,5	N8-15,6-16,8	1,270	0,915	72,0	N11-4,8-6,0	2,123	1,428	67,3	N14-16,8-18,0	1,418	0,950	67,0	N16-19,2-20,1	1,569	1,106	70,5	N18-18,0-19,2	2,948	1,956	66,4	N20-18,0-19,2	1,874	1,406	75,0	N23-7,2-8,4	1,334	0,892	66,9	E5-14-4-15,6	1,398	0,900	64,4	E7-10,8-12,0	1,494	1,052	70,4				
N1-2-4-3,6	2,341	1,649	70,5	N4-8-4-9,6	1,414	1,006	71,1	N6-16,8-18,0	1,442	1,026	71,2	N8-16,8-18,0	1,122	0,814	72,5	N11-6,0-7,2	1,541	1,034	67,1	N14-18,0-19,2	1,464	0,990	67,6	N16-20-4-21,1	2,811	1,930	68,7	N18-19,2-20,4	1,956	1,304	66,7	N21-0-1,2	1,173	0,801	68,3	N23-8-4-9,6	1,384	0,878	63,4	E5-15,6-16,8	1,450	1,034	71,3	E7-12,0-13,2	1,460	0,994	68,1				
N1-3,6-4,8	1,690	1,187	70,2	N4-9,6-10,8	1,380	0,998	72,3	N6-18,0-19,2	1,308	0,832	63,6	N8-18,0-19,2	1,527	1,114	72,9	N11-7,2-8,4	1,757	1,184	67,4	N14-19,2-20,1	0,86	0,588	68,4	N16-21,6-22,1	2,976	2,048	68,8	N18-20-4-21,6	2,356	1,624	68,9	N21-1,2-2,4	0,754	0,526	69,8	N23-9,6-10,8	1,716	0,882	51,4	E5-16,8-18,0	1,562	1,034	66,2	E7-13,2-14,4	1,474	1,000	67,8				
N1-4,8-6,0	2,446	1,669	68,3	N4-10,8-12,0	1,554	1,062	68,3	N6-19,2-20,4	1,318	0,856	64,9	N8-19,2-20,4	1,277	0,954	74,7	N11-8-4-9,6	1,942	1,306	67,3	N13-1,2-2,4	0,803	0,584	67,7	N16-22,8-24,1	2,553	1,774	69,5	N18-21,6-22,8	1,556	1,040	66,8	N21-2-4-3,6	1,238	0,844	68,2	N23-10,8-12,0	1,774	0,728	41,0	E5-18,0-19,2	1,466	1,030	70,7	E7-14-4-15,6	1,564	1,014	64,8				
N1-6,0-7,2	2,770	1,899	68,5	N4-12,0-13,2	1,438	1,060	73,7	N6-20-4-21,6	1,220	0,814	66,7	N8-20-4-21,6	2,562	1,816	70,9	N11-9,6-10,8	1,416	0,958	67,7	N13-2-4-3,6	1,366	0,935	68,5	N17-0-1,2	1,76	1,187	67,44	N19-22,8-24,0	1,394	0,942	67,6	N21-3,6-4,8	1,448	0,990	68,4	N23-12,0-13,2	0,802	0,450	56,1	E5-19,2-20,4	1,468	0,938	63,9	E7-15,6-16,8	1,380	0,942	68,3				
N1-7,2-8,4	2,916	2,093	71,8	N4-13,2-14,4	1,238	0,846	68,3	N6-21,6-22,8	0,970	0,656	67,6	N8-21,6-22,8	2,250	1,462	65,0	N11-10,8-12,0	1,482	1,000	67,5	N13-3,6-4,8	0,710	0,501	70,6	N17-1,2-2,4	2,640	1,784	67,6	N19-24,0-25,2	1,588	1,080	68,0	N21-4,8-6,0	0,700	0,526	75,1	N23-13,2-14,4	1,406	0,734	52,2	E5-20-4-21,6	1,276	0,744	58,3	E7-16,8-18,0	1,568	1,062	67,7				
N1-8-4-9,6	3,110	2,293	73,8	N4-14-4-15,6	1,278	0,852	66,7	N7-0-1,2	2,340	1,616	69,1	N9-0-1,2	2,999	2,096	69,9	N11-12,0-13,2	1,325	0,888	67,0	N13-4,8-6,0	0,067	0,446	68,8	N17-2-4-3,6	1,366	0,892	65,3	N19-0-1,2	1,714	1,138	66,39	N21-6,0-7,2	1,066	0,802	75,2	N23-14-4-15,6	2,416	1,532	63,4	E5-21,6-22,8	1,276	0,834	65,4	E7-18,0-19,2	1,492	1,004	67,3				
N1-9,6-10,8	2,954	2,073	70,2	N4-15,6-16,8	1,452	0,995	68,5	N7-1,2-2,4	1,594	1,092	68,5	N9-1,2-2,4	2,671	1,828	68,4	N11-13,2-14,4	2,286	1,554	68,0	N13-6,0-7,2	0,764	0,522	68,3	N17-3,6-4,8	1,450	0,972	67,0	N19-1,2-2,4	2,446	1,661	67,9	N21-7,2-8,4	0,968	0,672	69,4	E2-0-1,2	1,607	1,072	66,7	E5-22,8-24,0	1,380	0,816	59,1	E7-19,2-20,4	1,448	1,000	69,1				
N1-10,8-12,0	2,715	1,713	63,1	N4-16,8-18,0	2,070	1,304	63,0	N7-4-3,6	1,284	0,880	68,5	N9-2-4-3,6	1,551	1,062	68,5	N11-14-4-15,6	2,522	1,650	65,4	N13-7,2-8,4	0,668	0,461	69,0	N17-4,8-6,0	1,342	0,878	65,4	N19-2-4-3,6	1,480	1,016	68,6	N21-8-4-9,6	1,222	0,802	65,6	E2-1,2-2,4	1,534	1,044	68,1	E5-24,0-25,2	2,036	1,364	67,0	E7-20-4-21,6	2,050	1,422	69,4				
N1-12,0-13,2	1,054	0,700	66,4	N5-0-1,2	1,596	1,088	68,2	N7-3,6-4,8	1,572	1,120	71,2	N9-3,6-4,8	0,998	0,680	68,1	N11-15,6-16,8	2,973	2,006	67,5	N13-8-4-9,6	0,781	0,524	67,1	N17-6,0-7,2	1,434	1,016	70,9	N19-3,6-4,8	1,524	1,022	67,1	N21-9,6-10,8	2,468	1,630	66,0	E2-4-3,6	1,486	1,020	68,6	E6-0-1,2	1,745	1,200	68,8	E7-21,6-22,8	1,466	1,028	70,1				
N2-0-1,2	1,326	0,914	68,9	N5-1,2-2,4	1,348	0,918	68,1	N7-8,6-6,0	1,390	1,004	72,9	N9-4,8-6,0	1,655	1,114	67,3	N11-16,8-18,0	1,786	1,174	65,7	N13-9,6-10,8	0,703	0,487	69,2	N17-7,2-8,4	1,482	1,010	68,2	N19-4,8-6,0	1,368	0,946	69,2	N21-10,8-12,0	1,122	0,854	76,1	E2-3,6-4,8	1,802	1,152	63,9	E6-1,2-2,4	1,352	0,93	68,8	E7-22,8-24,0	1,354	0,948	70,0				
N2-1,2-2,4	2,084	1,296	62,2	N5-2-4-3,6	1,480	1,036	70,0	N7-6,0-7,2	1,340	0,906	67,6	N9-6,0-7,2	1,284	0,890	69,3	N12-0-1,2	2,402	1,638	68,2	N13-10,8-12,0	0,571	0,382	66,8	N17-8-4-9,6	1,434	0,956	66,7	N19-6,0-7,2	1,608	1,070	66,5	N21-12,0-13,2	0,972	0,626	64,4	E3-0-1,2	1,4197	0,9742	68,6	E6-2-4-3,6	1,532	1,050	68,5	E7-24,0-25,2	1,644	1,062	64,6				
N2-2-4-3,6	1,564	1,176	75,2	N5-3,6-4,8	1,544	1,096	71,0	N7-7,2-8,4	1,496	0,974	65,1	N9-7,2-8,4	1,536	1,062	69,1	N12-1,2-2,4	2,176	1,464	67,3	N13-12,0-13,2	0,899	0,631	70,2	N17-9,6-10,8	1,464	0,988	67,5	N19-7,2-8,4	1,342	0,874	65,1	N21-13,2-14,4	0,708	0,562	79,4	E3-1,2-2,4	1,486	1,006	67,7	E6-3,6-4,8	1,332	0,932	70,0	E8-0-1,2	1,576	1,050	66,6				
N2-3,6-4,8	1,526	1,122	73,5	N5-4,8-6,0	1,304	0,904	72,8	N7-8-4-9,6	1,210	0,770	63,6	N9-8-4-9,6	1,545	1,050	68,0	N12-2-4-3,6	1,596	1,144	71,7	N13-13,2-14,4	1,013	0,694	68,5	N17-10,8-12,1	1,488	1,038	69,8	N19-8-4-9,6	1,584	1,054	66,5	N21-14-4-15,6	1,304	0,848	65,0	E3-2-4-3,6	1,238	0,920	74,3	E6-4,8-6,0	1,580	1,128	71,4	E8-1,2-2,4	2,452	1,612	65,7				
N2-4,8-6,0	1,506	1,164	72,9	N5-6,0-7,2	1,604	1,120	69,8	N7-9,6-10,8	1,408	0,910	64,6	N9-9,6-10,8	1,243	0,860	69,2	N12-3,6-4,8	1,848	1,224	66,2	N13-14-4-15,6	1,238	0,849	68,6	N17-12,0-13,1	1,366	0,870	63,7	N19-9,6-10,8	2,352	1,558	66,2	N21-15,6-16,8	0,916	0,608	66,4	E3-3,6-4,8	1,500	1,056	70,4	E6-6,0-7,2	1,566	1,134	72,4	E8-2-4-3,6	1,474	1,002	68,0				
N2-6,0-7,2	1,556	1,194	76,7	N5-7,2-8,4	1,062	0,738	69,5	N7-10,8-12,0	1,118	0,792	70,8	N9-10,8-12,0	1,285	0,868	67,5	N12-4,8-6,0	1,287	0,852	66,2	N13-15,6-16,8	1,446	0,993	68,7	N17-13,2-14,1	1,416	0,918	64,8	N19-10,8-12,0	1,416	0,964	68,1	N21-16,8-18,0	1,264	0,768	60,8	E3-4,8-6,0	1,568	1,058	67,5	E6-7,2-8,4	1,472	1,060	72,0	E8-3,6-4,8	1,494	1,004	67,2				
N2-7,2-8,4	1,518	1,090	71,8	N5-8-4-9,6	1,562	1,092	69,9	N7-12,0-13,2	1,420																																										

Figura 66 - Histograma dos valores da umidade das amostras.

Na figura 67 está demonstrado o “Boxplot” dos dados da umidade das amostras. Neste gráfico podemos determinar os valores máximo (79,66%), valor mínimo (51,40%), mediana (68,06%), primeiro quartil (66,40%) e terceiro quartil (69,89%).

Figura 67 - “Boxplot” dos dados de umidade das amostras.

5.1.2 Concentração de níquel

As concentrações de níquel das 482 amostras são demonstradas na tabela 21.

Tabela 21 - Concentrações de níquel das amostras de rejeito Caron.

Amostra	Concentração de Ni (%)	Amostra	Concentração de Ni (%)	Amostra	Concentração de Ni (%)	Amostra	Concentração de Ni (%)	Amostra	Concentração de Ni (%)	Amostra	Concentração de Ni (%)	Amostra	Concentração de Ni (%)	Amostra	Concentração de Ni (%)	Amostra	Concentração de Ni (%)	Amostra	Concentração de Ni (%)	Amostra	Concentração de Ni (%)	Amostra	Concentração de Ni (%)	Amostra	Concentração de Ni (%)
N0-0-1,2	0,613	N4-0-1,2	0,488	N6-8-4-9,6	0,404	N8-8-4-9,6	0,564	N10-14-4-15,6	0,485	N14-9-6-10,8	0,488	N16-12-0-13,2	0,485	N18-10-8-12,0	0,503	N20-10-8-12,0	0,475	N23-0-1,2	0,478	E5-7-2-8,4	0,415	E7-3-6-4,8	0,516	E9-2-4-3,6	0,517
N0-1,2-2,4	0,476	N4-1,2-2,4	0,562	N6-9-6-10,8	0,434	N8-9-6-10,8	0,567	N10-15-6-16,8	0,381	N14-10-8-12,0	0,496	N16-13-2-14,4	0,494	N18-12-0-13,2	0,524	N20-12-0-13,2	0,494	N23-1,2-2,4	0,410	E5-8-4-9,6	0,391	E7-4-8-6,0	0,525	E9-3-6-4,8	0,461
N0-2,4-3,6	0,551	N4-2,4-3,6	0,511	N6-10-8-12,0	0,568	N8-10-8-12,0	0,511	N11-0-1,2	0,478	N14-12-0-13,2	0,512	N16-14-4-15,6	0,476	N18-13-2-14,4	0,498	N20-13-2-14,4	0,497	N23-2-4-3,6	0,478	E5-9-6-10,8	0,450	E7-6-0-7,2	0,514	E9-4-8-6,0	0,398
N0-3,6-4,8	0,428	N4-3,6-4,8	0,563	N6-12-0-13,2	0,486	N8-12-0-13,2	0,479	N11-1,2-2,4	0,502	N14-13-2-14,4	0,442	N16-15-6-16,8	0,486	N18-14-4-15,6	0,502	N20-14-4-15,6	0,501	N23-3-6-4,8	0,501	E5-10-8-12,0	0,339	E7-7-2-8,4	0,439		
N0-4,8-6,0	0,229	N4-4,8-6,0	0,571	N6-13-2-14,4	0,529	N8-13-2-14,4	0,615	N11-2,4-3,6	0,440	N14-14-4-15,6	0,467	N16-16-8-18,0	0,499	N18-15-6-16,8	0,489	N20-15-6-16,8	0,450	N23-4-8-6,0	0,426	E5-12-0-13,2	0,390	E7-8-4-9,6	0,468		
N1-0-1,2	0,465	N4-6-0-7,2	0,479	N6-14-4-15,6	0,601	N8-14-4-15,6	0,556	N11-3-6-4,8	0,495	N14-15-6-16,8	0,460	N16-18-0-19,2	0,484	N18-16-8-18,0	0,459	N20-16-8-18,0	0,466	N23-6-0-7,2	0,491	E5-13-2-14,4	0,452	E7-9-6-10,8	0,501		
N1-1,2-2,4	0,511	N4-7-2-8,4	0,511	N6-15-6-16,8	0,508	N8-15-6-16,8	0,457	N11-4-8-6,0	0,497	N14-16-8-18,0	0,476	N16-19-2-20,4	0,438	N18-18-0-19,2	0,502	N20-18-0-19,2	0,118	N23-7-2-8,4	0,502	E5-14-4-15,6	0,515	E7-10-8-12,0	0,467		
N1-2,4-3,6	0,479	N4-8-4-9,6	0,545	N6-16-8-18,0	0,485	N8-16-8-18,0	0,461	N11-6-0-7,2	0,476	N14-18-0-19,2	0,175	N16-20-4-21,6	0,498	N18-19-2-20,4	0,472	N21-0-1,2	0,482	N23-8-4-9,6	0,509	E5-15-6-16,8	0,429	E7-12-0-13,2	0,470		
N1-3-6-4,8	0,485	N4-9-6-10,8	0,550	N6-18-0-19,2	0,519	N8-18-0-19,2	0,438	N11-7-2-8,4	0,485	N15-0-1-2	0,468	N16-21-6-22,8	0,552	N18-20-4-21,6	0,423	N21-1,2-2,4	0,469	N23-9-6-10,8	0,469	E5-16-8-18,0	0,497	E7-13-2-14,4	0,478		
N1-4-8-6,0	0,460	N4-10-8-12,0	0,470	N6-19-2-20,4	0,508	N8-19-2-20,4	0,448	N11-8-4-9,6	0,490	N15-1,2-2,4	0,533	N16-22-8-24,0	0,398	N18-21-6-22,8	0,501	N21-2-4-3,6	0,493	N23-10-8-12,0	0,550	E5-18-0-19,2	0,476	E7-14-4-15,6	0,436		
N1-6-0-7,2	0,530	N4-12-0-13,2	0,364	N6-20-4-21,6	0,492	N8-20-4-21,6	0,471	N11-9-6-10,8	0,502	N15-2-4-3,6	0,503	N17-0-1,2	0,472	N18-22-8-24,0	0,448	N21-3-6-4,8	0,489	N23-12-0-13,2	0,420	E5-19-2-20,4	0,263	E7-15-6-16,8	0,471		
N1-7-2-8,4	0,465	N4-13-2-14,4	0,451	N6-21-6-22,8	0,230	N8-21-6-22,8	0,474	N11-10-8-12,0	0,494	N15-3-6-4,8	0,497	N17-1,2-2,4	0,458	N18-24-0-25,2	0,142	N21-4-8-6,0	0,376	N23-13-2-14,4	0,410	E5-20-4-21,6	0,571	E7-16-8-18,0	0,479		
N1-8-4-9,6	0,394	N4-14-4-15,6	0,458	N7-0-1,2	0,461	N9-0-1,2	0,448	N11-12-0-13,2	0,497	N15-4-8-6,0	0,517	N17-2-4-3,6	0,523	N19-0-1,2	0,484	N21-6-0-7,2	0,516	N23-14-4-15,6	0,530	E5-21-6-22,8	1,925	E7-18-0-19,2	0,482		
N1-9-6-10,8	0,390	N4-15-6-16,8	0,134	N7-1-2-2,4	0,578	N9-1-2-2,4	0,624	N11-13-2-14,4	0,491	N15-6-0-7,2	0,477	N17-3-6-4,8	0,465	N19-1-2-2,4	0,490	N21-7-2-8,4	0,450	E2-0-1,2	0,481	E5-22-8-24,0	0,677	E7-19-2-20,4	0,439		
N1-10-8-12,0	0,508	N4-16-8-18,0	0,140	N7-2-4-3,6	0,536	N9-2-4-3,6	0,451	N11-14-4-15,6	0,431	N15-7-2-8,4	0,508	N17-4-8-6,0	0,524	N19-2-4-3,6	0,468	N21-8-4-9,6	0,497	E2-1,2-2,4	0,469	E5-24-0-25,2	0,662	E7-20-4-21,6	0,489		
N1-12-0-13,2	0,113	N5-0-1,2	0,474	N7-3-6-4,8	0,494	N9-3-6-4,8	0,485	N11-15-6-16,8	0,497	N15-8-4-9,6	0,493	N17-6-0-7,2	0,398	N19-3-6-4,8	0,474	N21-9-6-10,8	0,477	E2-4-3-6	0,493	E6-0-1,2	0,438	E7-21-6-22,8	0,466		
N2-0-1,2	0,463	N5-1,2-2,4	0,562	N7-4-8-6,0	0,457	N9-4-8-6,0	0,482	N11-16-8-18,0	0,328	N15-9-6-10,8	0,445	N17-7-2-8,4	0,481	N19-4-8-6,0	0,451	N21-10-8-12,0	0,472	E2-3-6-4,8	0,104	E6-1-2-2,4	0,447	E7-22-8-24,0	0,412		
N2-1,2-2,4	0,545	N5-2-4-3,6	0,504	N7-6-0-7,2	0,540	N9-6-0-7,2	0,479	N12-0-1,2	0,495	N15-10-8-12,0	0,483	N17-8-4-9,6	0,515	N19-6-0-7,2	0,431	N21-12-0-13,2	0,498	E3-0-1,2	0,488	E6-2-4-3,6	0,464	E7-24-0-25,2	0,129		
N2-2,4-3,6	0,408	N5-3-6-4,8	0,442	N7-7-2-8,4	0,588	N9-7-2-8,4	0,472	N12-1-2-2,4	0,483	N15-12-0-13,2	0,474	N17-9-6-10,8	0,463	N19-7-2-8,4	0,489	N21-13-2-14,4	0,473	E3-1-2-2,4	0,479	E6-3-6-4,8	0,432	E8-0-1,2	0,478		
N2-3-6-4,8	0,442	N5-4-8-6,0	0,488	N7-8-4-9,6	0,551	N9-8-4-9,6	0,465	N12-2-4-3,6	0,505	N15-13-2-14,4	0,503	N17-10-8-12,0	0,390	N19-8-4-9,6	0,483	N21-14-4-15,6	0,468	E3-2-4-3,6	0,527	E6-4-8-6,0	0,476	E8-1-2-2,4	0,492		
N2-4-8-6,0	0,469	N5-6-0-7,2	0,624	N7-9-6-10,8	0,508	N9-9-6-10,8	0,471	N12-3-6-4,8	0,494	N15-14-4-15,6	0,529	N17-12-0-13,2	0,481	N19-9-6-10,8	0,512	N21-15-6-16,8	0,532	E3-3-6-4,8	0,469	E6-6-0-7,2	0,431	E8-2-4-3,6	0,475		
N2-6-0-7,2	0,514	N5-7-2-8,4	0,585	N7-10-8-12,0	0,459	N9-10-8-12,0	0,485	N12-4-8-6,0	0,514	N15-16-16,8	0,489	N17-13-2-14,4	0,501	N19-10-8-12,0	0,498	N21-16-8-18,0	0,534	E3-4-8-6,0	0,477	E6-7-2-8,4	0,475	E8-3-6-4,8	0,464		
N2-7-2-8,4	0,468	N5-8-4-9,6	0,487	N7-12-0-13,2	0,473	N9-12-0-13,2	0,471	N12-6-0-7,2	0,509	N15-16-8-18,0	0,500	N17-14-4-15,6	0,422	N19-12-0-13,2	0,497	N21-18-0-19,2	0,114	E3-6-0-7,2	0,498	E6-8-4-9,6	0,363	E8-4-8-6,0	0,487		
N2-8-4-9,6	0,505	N5-9-6-10,8	0,418	N7-13-2-14,4	0,528	N9-13-2-14,4	0,561	N12-7-2-8,4	0,450	N15-18-0-19,2	0,400	N17-15-6-16,8	0,442	N19-13-2-14,4	0,480	N22-0-1,2	0,48	E3-7-2-8,4	0,479	E6-9-6-10,8	0,458	E8-6-0-7,2	0,470		
N2-9-6-10,8	0,391	N5-10-8-12,0	0,515	N7-14-4-15,6	0,549	N9-14-4-15,6	0,540	N12-8-4-9,6	0,481	N15-19-2-20,4	0,433	N17-16-8-18,0	0,474	N19-14-4-15,6	0,484	N22-1-2-2,4	0,499	E3-8-4-9,6	0,170	E6-10-8-12,0	0,460	E8-7-2-8,4	0,481		
N2-10-8-12,0	0,560	N5-12-0-13,2	0,499	N7-15-6-16,8	0,610	N9-15-6-16,8	0,524	N12-9-6-10,8	0,479	N15-20-4-21,6	0,436	N17-18-0-19,2	0,505	N19-15-6-16,8	0,479	N22-2-4-3,6	0,558	E4-0-1,2	0,523	E6-12-0-13,2	0,387	E8-8-4-9,6	0,464		
N2-12-0-13,2	0,068	N5-13-2-14,4	0,507	N7-16-8-18,0	0,598	N9-16-8-18,0	0,539	N12-10-8-12,0	0,493	N15-21-6-22,8	0,474	N17-19-2-20,4	0,442	N19-16-8-18,0	0,499	N22-3-6-4,8	0,430	E4-1-2-2,4	0,527	E6-13-2-14,4	0,461	E8-9-6-10,8	0,545		
N3-0-1,2	0,580	N5-14-4-15,6	0,430	N7-18-0-19,2	0,494	N9-18-0-19,2	0,498	N12-12-0-13,2	0,494	N15-22-8-24,0	0,492	N17-20-4-21,6	0,502	N19-18-0-19,2	0,495	N22-4-8-6,0	0,452	E4-2-4-3,6	0,571	E6-14-4-15,6	0,494	E8-10-8-12,0	0,474		
N3-1,2-2,4	0,545	N5-15-6-16,8	0,479	N7-19-2-20,4	0,547	N10-0-1,2	0,494	N12-13-2-14,4	0,494	N15-24-0-25,2	0,512	N17-21-6-22,8	0,496	N19-19-2-20,4	0,505	N22-6-0-7,2	0,474	E4-3-6-4,8	0,525	E6-15-6-16,8	0,431	E8-12-0-13,2	0,512		
N3-2,4-3,6	0,407	N5-16-8-18,0	0,478	N7-20-4-21,6	0,531	N10-1-2-2,4	0,483	N12-14-4-15,6	0,497	N15-25-2-26,4	0,138	N17-22-8-24,0	0,486	N19-20-4-21,6	0,500	N22-7-2-8,4	0,484	E4-4-8-6,0	0,544	E6-16-8-18,0	0,419	E8-13-2-14,4	0,483		
N3-3-6-4,8	0,482	N5-18-0-19,2	0,529	N7-21-6-22,8	0,562	N10-2-4-3,6	0,473	N12-15-6-16,8	0,495	N16-0-1,2	0,477	N17-24-0-25,2	0,130	N19-21-6-22,8	0,235	N22-8-4-9,6	0,467	E4-6-0-7,2	0,502	E6-18-0-19,2	0,442	E8-14-4-15,6	0,466		
N3-4-8-6,0	0,549	N5-19-2-20,4	0,653	N7-22-8-24,0	0,464	N10-3-6-4,8	0,506	N12-16-8-18,0	0,434	N16-1-2-2,4	0,502	N18-0-1,2	0,496	N20-0-1,2	0,485	N22-9-6-10,8	0,468	E4-7-2-8,4	0,525	E6-19-2-20,4	0,435	E8-15-6-16,8	0,446		
N3-6-0-7,2	0,417	N5-20-4-21,6	0,154	N7-24-0-25,2	0,513	N10-4-8-6,0	0,503	N14-0-1-2	0,452	N16-2-4-3,6	0,488	N18-1-2-2,4	0,497	N20-1-2-2,4	0,511	N22-10-8-12,0	0,496	E4-8-4-9,6	0,467	E6-20-4-21,6	0,391	E8-16-8-18,0	0,479		
N3-7-2-8,4	0,418	N6-0-1,2	0,450	N8-0-1,2	0,464	N10-6-0-7,2	0,499	N14-1-2-2,4	0,527	N16-3-6-4,8	0,460	N18-2-4-3,6	0,517	N20-2-4-3,6	0,540	N22-12-0-13,2	0,497	E4-9-6-10,8	0,360	E6-21-6-22,8	0,461	E8-18-0-19,2	0,436		
N3-8-4-9,6	0,538	N6-1-2-2,4	0,615	N8-1-2-2,4	0,534	N10-7-2-8,4	0,498	N14-2-4-3,6	0,513	N16-4-8-6,0	0,469	N18-3-6-4,8	0,495	N20-3-6-4,8	0,428	N22-13-2-14,4	0,464	E5-0-1,2	0,582	E6-22-8-24,0	0,439	E8-19-2-20,4	0,505		
N3-9-6-10,8	0,418	N6-2-4-3,6	0,442	N8-2-4-3,6	0,459	N10-8-4-9,6	0,499	N14-3-6-4,8	0,468	N16-6-0-7,2	0,448	N18-4-8-6,0	0,516	N20-4-8-6,0	0,424	N22-14-4-15,6	0,475	E5-1-2-2,4	0,396	E6-24-0-25,2	0,431	E8-20-4-21,6	0,431		
N3-10-8-12,0	0,529	N6-3-6-4,8	0,611	N8-3-6-4,8	0,574	N10-9-6-10,8	0,491	N14-4-8-6,0	0,463	N16-7-2-8,4	0,501	N18-6-0-7,2	0,530	N20-6-0-7,2	0,449	N22-15-6-16,8	0,483	E5-2-4-3,6	0,559	E6-25-2-26,4	0,151	E8-21-6-22,8	0,489		
N3-12-0-13,2	0,458	N6-4-8-6,0	0,612	N8-4-8-6,0	0,538	N10-10-8-12,0	0,500	N14-6-0-7,2	0,377	N16-8-4-9,6	0,439	N18-7-2-8,4	0,509	N20-7-2-8,4	0,483	N22-16-8-18,0	0,484	E5-3-6-4,8	0,402	E7-0-1,2	0,466	E8-22-8-24,0	0,050		
N3-13-2-14,4	0,508	N6-6-0-7,2	0,494	N8-6-0-7,2	0,577	N10-12-0-13,2	0,486																		

Como comentado anteriormente, as células hachuradas representam as amostras contaminadas com solo do fundo da barragem e que foram descartadas para o estudo estatístico, restando para a análise estatística 452 amostras. Após o descarte destas amostras, foi realizado um estudo estatístico para a determinação da variabilidade da concentração de níquel por toda a barragem. Foram determinados os valores de média, mediana, desvio padrão, valores máximo e mínimo e primeiro e terceiro quartis. Também foram confeccionados o histograma (figura 68) e “boxplot” (figura 69), destas informações. Os valores da média e desvio padrão são 0,4881 e 0,048 respectivamente enquanto o primeiro e terceiro quartis, mediana e valores máximo e mínimo que são 0,464, 0,509, 0,485, 0,725 e 0,339% Ni respectivamente.

Figura 68 - Histograma das concentrações de níquel das amostras de rejeito Caron.

Figura 69 - “Boxplot” das concentrações de níquel nas amostras de rejeito Caron.

Com o intuito de confirmar que a média amostral é representativa em relação à média populacional, foi estudada a inferência estatística através do teste de hipóteses. Para a concentração de níquel foram definidas duas hipóteses, sendo a hipótese nula ($H_0: \mu = 0,4881$) e a hipótese alternativa ($H_1: \mu \neq 0,4881$). Para este teste de hipóteses foi aplicado o nível de

significância (α) de 5% ou 0,05 e como o P-value calculado foi de 0,50, que é maior que o valor do nível de significância, aceita-se a hipótese nula. Isto é representado graficamente, através da figura 70, onde o H_0 não está na região crítica indicando que o P-value é maior que α , assim a média amostral pode ser aplicada como a média populacional.

Figura 70 - “Boxplot” com teste de hipóteses para os teores de Ni.

5.1.3 Concentração de cobalto

As concentrações de cobalto das 482 amostras são demonstradas na tabela 22.

Nas figuras 71 e 72 são apresentados o histograma e “boxplot” dos valores correspondentes às concentrações de cobalto nas amostras de rejeito Caron. Os valores da média e desvio padrão são 0,070 e 0,006 respectivamente enquanto o primeiro e terceiro quartis, mediana e valores máximo e mínimo que são 0,066, 0,075, 0,071, 0,090 e 0,055% Co respectivamente.

Figura 71 - Histograma das concentrações de cobalto nas amostras de rejeito Caron.

Tabela 22 - Concentrações de cobalto das amostras de rejeito Caron.

Amostra	Concentração de Co (%)	Amostra	Concentração de Co (%)	Amostra	Concentração de Co (%)	Amostra	Concentração de Co (%)	Amostra	Concentração de Co (%)	Amostra	Concentração de Co (%)	Amostra	Concentração de Co (%)	Amostra	Concentração de Co (%)	Amostra	Concentração de Co (%)	Amostra	Concentração de Co (%)	Amostra	Concentração de Co (%)	Amostra	Concentração de Co (%)	Amostra	Concentração de Co (%)
N0-0-1,2	0,072	N4-0-1,2	0,069	N6-8,4-9,6	0,072	N8-8,4-9,6	0,068	N10-14,4-15,6	0,062	N14-9,6-10,8	0,067	N16-12,0-13,2	0,069	N18-10,8-12,0	0,076	N20-10,8-12,0	0,070	N23-0-1,2	0,073	E5-7,2-8,4	0,081	E7-3,6-4,8	0,072	E9-2,4-3,6	0,075
N0-1,2-2,4	0,068	N4-1,2-2,4	0,064	N6-9,6-10,8	0,076	N8-9,6-10,8	0,068	N10-15,6-16,8	0,051	N14-10,8-12,0	0,070	N16-13,2-14,4	0,066	N18-12,0-13,2	0,076	N20-12,0-13,2	0,072	N23-1,2-2,4	0,082	E5-8,4-9,6	0,083	E7-4,8-6,0	0,076	E9-3,6-4,8	0,071
N0-2,4-3,6	0,064	N4-2,4-3,6	0,060	N6-10,8-12,0	0,063	N8-10,8-12,0	0,063	N11-0-1,2	0,066	N14-12,0-13,2	0,064	N16-14,4-15,6	0,062	N18-13,2-14,4	0,074	N20-13,2-14,4	0,068	N23-2,4-3,6	0,065	E5-9,6-10,8	0,076	E7-6,0-7,2	0,074	E9-4,8-6,0	0,053
N0-3,6-4,8	0,065	N4-3,6-4,8	0,076	N6-12,0-13,2	0,069	N8-12,0-13,2	0,067	N11-1,2-2,4	0,063	N14-13,2-14,4	0,073	N16-15,6-16,8	0,069	N18-14,4-15,6	0,073	N20-14,4-15,6	0,071	N23-3,6-4,8	0,075	E5-10,8-12,0	0,074	E7-7,2-8,4	0,072		
N0-4,8-6,0	0,031	N4-4,8-6,0	0,064	N6-13,2-14,4	0,061	N8-13,2-14,4	0,057	N11-2,4-3,6	0,067	N14-14,4-15,6	0,062	N16-16,8-18,0	0,072	N18-15,6-16,8	0,072	N20-15,6-16,8	0,069	N23-4,8-6,0	0,073	E5-12,0-13,2	0,076	E7-8,4-9,6	0,076		
N1-0-1,2	0,064	N4-6,0-7,2	0,076	N6-14,4-15,6	0,082	N8-14,4-15,6	0,062	N11-3,6-4,8	0,064	N14-15,6-16,8	0,070	N16-18,0-19,2	0,071	N18-16,8-18,0	0,072	N20-16,8-18,0	0,068	N23-6,0-7,2	0,063	E5-13,2-14,4	0,074	E7-9,6-10,8	0,076		
N1-1,2-2,4	0,074	N4-7,2-8,4	0,072	N6-15,6-16,8	0,071	N8-15,6-16,8	0,061	N11-4,8-6,0	0,063	N14-16,8-18,0	0,072	N16-19,2-20,4	0,076	N18-18,0-19,2	0,072	N20-18,0-19,2	0,016	N23-7,2-8,4	0,069	E5-14,4-15,6	0,070	E7-10,8-12,0	0,074		
N1-2,4-3,6	0,064	N4-8,4-9,6	0,072	N6-16,8-18,0	0,082	N8-16,8-18,0	0,062	N11-6,0-7,2	0,068	N14-18,0-19,2	0,026	N16-20,4-21,6	0,077	N18-19,2-20,4	0,076	N21-0-1,2	0,069	N23-8,4-9,6	0,088	E5-15,6-16,8	0,077	E7-12,0-13,2	0,075		
N1-3,6-4,8	0,064	N4-9,6-10,8	0,072	N6-18,0-19,2	0,074	N8-18,0-19,2	0,073	N11-7,2-8,4	0,061	N15-0-1,2	0,068	N16-21,6-22,8	0,065	N18-20,4-21,6	0,069	N21-1,2-2,4	0,070	N23-9,6-10,8	0,059	E5-16,8-18,0	0,070	E7-13,2-14,4	0,073		
N1-4,8-6,0	0,064	N4-10,8-12,0	0,073	N6-19,2-20,4	0,071	N8-19,2-20,4	0,076	N11-8,4-9,6	0,062	N15-1,2-2,4	0,063	N16-22,8-24,0	0,065	N18-21,6-22,8	0,071	N21-2,4-3,6	0,068	N23-10,8-12,0	0,065	E5-18,0-19,2	0,076	E7-14,4-15,6	0,073		
N1-6,0-7,2	0,064	N4-12,0-13,2	0,071	N6-20,4-21,6	0,071	N8-20,4-21,6	0,072	N11-9,6-10,8	0,068	N15-2,4-3,6	0,068	N17-0-1,2	0,07	N18-22,8-24,0	0,072	N21-3,6-4,8	0,069	N23-12,0-13,2	0,083	E5-19,2-20,4	0,037	E7-15,6-16,8	0,073		
N1-7,2-8,4	0,086	N4-13,2-14,4	0,080	N6-21,6-22,8	0,026	N8-21,6-22,8	0,047	N11-10,8-12,0	0,065	N15-3,6-4,8	0,065	N17-1,2-2,4	0,072	N18-24,0-25,2	0,026	N21-4,8-6,0	0,069	N23-13,2-14,4	0,083	E5-20,4-21,6	0,076	E7-16,8-18,0	0,073		
N1-8,4-9,6	0,080	N4-14,4-15,6	0,078	N7-0-1,2	0,076	N9-0-1,2	0,072	N11-12,0-13,2	0,066	N15-4,8-6,0	0,072	N17-2,4-3,6	0,074	N19-0-1,2	0,071	N21-6,0-7,2	0,082	N23-14,4-15,6	0,076	E5-21,6-22,8	0,230	E7-18,0-19,2	0,072		
N1-9,6-10,8	0,071	N4-15,6-16,8	0,028	N7-1,2-2,4	0,065	N9-1,2-2,4	0,066	N11-13,2-14,4	0,063	N15-6,0-7,2	0,066	N17-3,6-4,8	0,067	N19-1,2-2,4	0,075	N21-7,2-8,4	0,067	E2-0-1,2	0,077	E5-22,8-24,0	0,068	E7-19,2-20,4	0,072		
N1-10,8-12,0	0,055	N4-16,8-18,0	0,029	N7-2,4-3,6	0,062	N9-2,4-3,6	0,070	N11-14,4-15,6	0,064	N15-7,2-8,4	0,074	N17-4,8-6,0	0,079	N19-2,4-3,6	0,074	N21-8,4-9,6	0,060	E2-1,2-2,4	0,073	E5-24,0-25,2	0,070	E7-20,4-21,6	0,076		
N1-12,0-13,2	0,016	N5-0-1,2	0,066	N7-3,6-4,8	0,064	N9-3,6-4,8	0,066	N11-15,6-16,8	0,066	N15-8,4-9,6	0,076	N17-6,0-7,2	0,073	N19-3,6-4,8	0,073	N21-9,6-10,8	0,069	E2-2,4-3,6	0,081	E6-0-1,2	0,073	E7-21,6-22,8	0,072		
N2-0-1,2	0,067	N5-1,2-2,4	0,061	N7-4,8-6,0	0,077	N9-4,8-6,0	0,065	N11-16,8-18,0	0,054	N15-9,6-10,8	0,073	N17-7,2-8,4	0,072	N19-4,8-6,0	0,068	N21-10,8-12,0	0,067	E2-3,6-4,8	0,023	E6-1,2-2,4	0,072	E7-22,8-24,0	0,076		
N2-1,2-2,4	0,059	N5-2,4-3,6	0,062	N7-6,0-7,2	0,070	N9-6,0-7,2	0,064	N12-0-1,2	0,065	N15-10,8-12,0	0,069	N17-8,4-9,6	0,068	N19-6,0-7,2	0,068	N21-12,0-13,2	0,070	E3-0-1,2	0,075	E6-2,4-3,6	0,082	E7-24,0-25,2	0,020		
N2-2,4-3,6	0,072	N5-3,6-4,8	0,065	N7-7,2-8,4	0,063	N9-7,2-8,4	0,069	N12-1,2-2,4	0,063	N15-12,0-13,2	0,075	N17-9,6-10,8	0,065	N19-7,2-8,4	0,064	N21-13,2-14,4	0,068	E3-1,2-2,4	0,076	E6-3,6-4,8	0,074	E8-0-1,2	0,074		
N2-3,6-4,8	0,071	N5-4,8-6,0	0,082	N7-8,4-9,6	0,056	N9-8,4-9,6	0,064	N12-2,4-3,6	0,064	N15-13,2-14,4	0,067	N17-10,8-12,0	0,070	N19-8,4-9,6	0,068	N21-14,4-15,6	0,065	E3-2,4-3,6	0,079	E6-4,8-6,0	0,079	E8-1,2-2,4	0,072		
N2-4,8-6,0	0,068	N5-6,0-7,2	0,069	N7-9,6-10,8	0,059	N9-9,6-10,8	0,066	N12-3,6-4,8	0,062	N15-14,4-15,6	0,068	N17-12,0-13,2	0,061	N19-9,6-10,8	0,072	N21-15,6-16,8	0,064	E3-3,6-4,8	0,072	E6-6,0-7,2	0,075	E8-2,4-3,6	0,076		
N2-6,0-7,2	0,078	N5-7,2-8,4	0,057	N7-10,8-12,0	0,068	N9-10,8-12,0	0,066	N12-4,8-6,0	0,068	N15-15,6-16,8	0,072	N17-13,2-14,4	0,062	N19-10,8-12,0	0,076	N21-16,8-18,0	0,073	E3-4,8-6,0	0,075	E6-7,2-8,4	0,082	E8-3,6-4,8	0,070		
N2-7,2-8,4	0,085	N5-8,4-9,6	0,073	N7-12,0-13,2	0,068	N9-12,0-13,2	0,070	N12-6,0-7,2	0,070	N15-16,8-18,0	0,078	N17-14,4-15,6	0,068	N19-12,0-13,2	0,076	N21-18,0-19,2	0,019	E3-6,0-7,2	0,073	E6-8,4-9,6	0,077	E8-4,8-6,0	0,077		
N2-8,4-9,6	0,077	N5-9,6-10,8	0,072	N7-13,2-14,4	0,063	N9-13,2-14,4	0,067	N12-7,2-8,4	0,073	N15-18,0-19,2	0,080	N17-15,6-16,8	0,072	N19-13,2-14,4	0,075	N22-0-1,2	0,07	E3-7,2-8,4	0,073	E6-9,6-10,8	0,080	E8-6,0-7,2	0,072		
N2-9,6-10,8	0,073	N5-10,8-12,0	0,072	N7-14,4-15,6	0,062	N9-14,4-15,6	0,064	N12-8,4-9,6	0,068	N15-19,2-20,4	0,069	N17-16,8-18,0	0,079	N19-14,4-15,6	0,064	N22-1,2-2,4	0,067	E3-8,4-9,6	0,016	E6-10,8-12,0	0,079	E8-7,2-8,4	0,072		
N2-10,8-12,0	0,071	N5-12,0-13,2	0,071	N7-15,6-16,8	0,062	N9-15,6-16,8	0,060	N12-9,6-10,8	0,069	N15-20,4-21,6	0,076	N17-18,0-19,2	0,068	N19-15,6-16,8	0,068	N22-2,4-3,6	0,078	E4-0-1,2	0,069	E6-12,0-13,2	0,072	E8-8,4-9,6	0,071		
N2-12,0-13,2	0,009	N5-13,2-14,4	0,072	N7-16,8-18,0	0,063	N9-16,8-18,0	0,057	N12-10,8-12,0	0,063	N15-21,6-22,8	0,065	N17-19,2-20,4	0,072	N19-16,8-18,0	0,068	N22-3,6-4,8	0,072	E4-1,2-2,4	0,067	E6-13,2-14,4	0,072	E8-9,6-10,8	0,078		
N3-0-1,2	0,066	N5-14,4-15,6	0,077	N7-18,0-19,2	0,077	N9-18,0-19,2	0,052	N12-12,0-13,2	0,071	N15-22,8-24,0	0,067	N17-20,4-21,6	0,072	N19-18,0-19,2	0,068	N22-4,8-6,0	0,064	E4-2,4-3,6	0,077	E6-14,4-15,6	0,063	E8-10,8-12,0	0,070		
N3-1,2-2,4	0,062	N5-15,6-16,8	0,082	N7-19,2-20,4	0,077	N10-0-1,2	0,063	N12-13,2-14,4	0,062	N15-24,0-25,2	0,070	N17-21,6-22,8	0,072	N19-19,2-20,4	0,073	N22-6,0-7,2	0,083	E4-3,6-4,8	0,067	E6-15,6-16,8	0,072	E8-12,0-13,2	0,078		
N3-2,4-3,6	0,083	N5-16,8-18,0	0,080	N7-20,4-21,6	0,071	N10-1,2-2,4	0,061	N12-14,4-15,6	0,072	N15-25,2-26,4	0,020	N17-22,8-24,0	0,065	N19-20,4-21,6	0,069	N22-7,2-8,4	0,076	E4-4,8-6,0	0,061	E6-16,8-18,0	0,080	E8-13,2-14,4	0,072		
N3-3,6-4,8	0,065	N5-18,0-19,2	0,076	N7-21,6-22,8	0,068	N10-2,4-3,6	0,064	N12-15,6-16,8	0,070	N16-0-1,2	0,072	N17-24,0-25,2	0,023	N19-21,6-22,8	0,040	N22-8,4-9,6	0,063	E4-6,0-7,2	0,071	E6-18,0-19,2	0,076	E8-14,4-15,6	0,069		
N3-4,8-6,0	0,066	N5-19,2-20,4	0,068	N7-22,8-24,0	0,076	N10-3,6-4,8	0,068	N12-16,8-18,0	0,061	N16-1,2-2,4	0,074	N18-0-1,2	0,073	N20-0-1,2	0,071	N22-9,6-10,8	0,067	E4-7,2-8,4	0,078	E6-19,2-20,4	0,071	E8-15,6-16,8	0,070		
N3-6,0-7,2	0,069	N5-20,4-21,6	0,021	N7-24,0-25,2	0,069	N10-4,8-6,0	0,067	N14-0-1,2	0,066	N16-2,4-3,6	0,084	N18-1,2-2,4	0,069	N20-1,2-2,4	0,069	N22-10,8-12,0	0,059	E4-8,4-9,6	0,065	E6-20,4-21,6	0,076	E8-16,8-18,0	0,072		
N3-7,2-8,4	0,072	N6-0-1,2	0,068	N8-0-1,2	0,078	N10-6,0-7,2	0,061	N14-1,2-2,4	0,061	N16-3,6-4,8	0,077	N18-2,4-3,6	0,076	N20-2,4-3,6	0,072	N22-12,0-13,2	0,086	E4-9,6-10,8	0,050	E6-21,6-22,8	0,069	E8-18,0-19,2	0,072		
N3-8,4-9,6	0,088	N6-1,2-2,4	0,065	N8-1,2-2,4	0,063	N10-7,2-8,4	0,067	N14-2,4-3,6	0,068	N16-4,8-6,0	0,074	N18-3,6-4,8	0,069	N20-3,6-4,8	0,068	N22-13,2-14,4	0,072	E5-0-1,2	0,084	E6-22,8-24,0	0,071	E8-19,2-20,4	0,073		
N3-9,6-10,8	0,078	N6-2,4-3,6	0,065	N8-2,4-3,6	0,075	N10-8,4-9,6	0,060	N14-3,6-4,8	0,076	N16-6,0-7,2	0,074	N18-4,8-6,0	0,079	N20-4,8-6,0	0,068	N22-14,4-15,6	0,055	E5-1,2-2,4	0,082	E6-24,0-25,2	0,076	E8-20,4-21,6	0,069		
N3-10,8-12,0	0,088	N6-3,6-4,8	0,068	N8-3,6-4,8	0,065	N10-9,6-10,8	0,060	N14-4,8-6,0	0,066	N16-7,2-8,4	0,078	N18-6,0-7,2	0,079	N20-6,0-7,2	0,072	N22-15,6-16,8	0,078	E5-2,4-3,6	0,076	E6-25,2-26,4	0,031	E8-21,6-22,8	0,090		
N3-12,0-13,2	0,082	N6-4,8-6,0	0,064	N8-4,8-6,0	0,069	N10-10,8-12,0	0,062	N14-6,0-7,2	0,076	N16-8,4-9,6	0,064	N18-7,2-8,4	0,069	N20-7,2-8,4	0,068	N22-16,8-18,0	0,065	E5-3,6-4,8							

Figura 72 - “Boxplot” das concentrações de cobalto nas amostras de rejeito Caron.

Com o intuito de confirmar que a média amostral é representativa em relação à média populacional, foi estudada a inferência estatística através do teste de hipóteses. Para a concentração de níquel foram definidas duas hipóteses, sendo a hipótese nula ($H_0: \mu = 0,07056$) e a hipótese alternativa ($H_1: \mu \neq 0,07056$). Para este teste de hipóteses foi aplicado o nível de significância (α) de 5% ou 0,05 e como o P-value calculado foi de 0,506, que é maior que o valor do nível de significância, aceita-se a hipótese nula. Isto é representado graficamente, através da figura 73, onde o H_0 não está na região crítica, indicando que o P-value é maior que α , assim a média amostral pode ser aplicada como a média populacional.

Figura 73 - “Boxplot” com teste de hipóteses para os teores de Co.

5.1.4 Concentração de ferro

As concentrações de ferro das 482 amostras são apresentadas na tabela 23.

Nas figuras 74 e 75 são apresentados o histograma e “boxplot” dos valores correspondentes às concentrações de ferro nas amostras de rejeito Caron. Os valores da média e desvio padrão são 33,31 e 2,836, respectivamente, enquanto o primeiro e terceiro quartis, mediana e valores máximo e mínimo que são 32,10, 35,00, 34,00, 39,80 e 21,50% Fe, respectivamente.

Figura 74 - Histograma das concentrações de ferro nas amostras de rejeito Caron.

Figura 75 - “Boxplot” das concentrações de ferro nas amostras de rejeito Caron.

Tabela 23 - Concentrações de ferro das amostras de rejeito Caron.

Amostra	Concentração de Fe (%)	Amostra	Concentração de Fe (%)	Amostra	Concentração de Fe (%)	Amostra	Concentração de Fe (%)	Amostra	Concentração de Fe (%)	Amostra	Concentração de Fe (%)	Amostra	Concentração de Fe (%)	Amostra	Concentração de Fe (%)	Amostra	Concentração de Fe (%)	Amostra	Concentração de Fe (%)	Amostra	Concentração de Fe (%)	Amostra	Concentração de Fe (%)	Amostra	Concentração de Fe (%)
N0-0-1,2	30,9	N4-0-1,2	35,3	N6-8,4-9,6	22,9	N8-8,4-9,6	30,8	N10-14,4-15,6	32,7	N14-9,6-10,8	34,8	N16-12,0-13,2	34,1	N18-10,8-12,0	35,3	N20-10,8-12,0	36,4	N23-0-1,2	34,6	E5-7,2-8,4	30,0	E7-3,6-4,8	35,5	E9-2,4-3,6	35,1
N0-1,2-2,4	36,0	N4-1,2-2,4	32,2	N6-9,6-10,8	25,7	N8-9,6-10,8	30,5	N10-15,6-16,8	29,2	N14-10,8-12,0	36,2	N16-13,2-14,4	33,6	N18-12,0-13,2	36,7	N20-12,0-13,2	36,0	N23-1,2-2,4	36,0	E5-8,4-9,6	29,5	E7-4,8-6,0	34,3	E9-3,6-4,8	34,1
N0-2,4-3,6	33,8	N4-2,4-3,6	31,3	N6-10,8-12,0	29,2	N8-10,8-12,0	29,6	N11-0-1,2	35,3	N14-12,0-13,2	34,2	N16-14,4-15,6	34,3	N18-13,2-14,4	35,5	N20-13,2-14,4	35,0	N23-2,4-3,6	33,8	E5-9,6-10,8	32,7	E7-6,0-7,2	34,8	E9-4,8-6,0	28,1
N0-3,6-4,8	36,3	N4-3,6-4,8	32,7	N6-12,0-13,2	35,7	N8-12,0-13,2	27,8	N11-1,2-2,4	35,3	N14-13,2-14,4	33,6	N16-15,6-16,8	34,6	N18-14,4-15,6	35,7	N20-14,4-15,6	34,6	N23-3,6-4,8	35,0	E5-10,8-12,0	31,9	E7-7,2-8,4	36,2		
N0-4,8-6,0	21,3	N4-4,8-6,0	34,1	N6-13,2-14,4	28,7	N8-13,2-14,4	26,9	N11-2,4-3,6	39,2	N14-14,4-15,6	35,2	N16-16,8-18,0	34,8	N18-15,6-16,8	35,5	N20-15,6-16,8	36,6	N23-4,8-6,0	39,8	E5-12,0-13,2	32,9	E7-8,4-9,6	36,2		
N1-0-1,2	30,9	N4-6,0-7,2	27,1	N6-14,4-15,6	31,1	N8-14,4-15,6	29,4	N11-3,6-4,8	34,8	N14-15,6-16,8	33,6	N16-18,0-19,2	35,5	N18-16,8-18,0	36,9	N20-16,8-18,0	35,3	N23-6,0-7,2	34,5	E5-13,2-14,4	32,8	E7-9,6-10,8	35,8		
N1-1,2-2,4	29,7	N4-7,2-8,4	29,4	N6-15,6-16,8	34,4	N8-15,6-16,8	30,5	N11-4,8-6,0	34,3	N14-16,8-18,0	35,3	N16-19,2-20,4	37,6	N18-18,0-19,2	35,7	N20-18,0-19,2	10,6	N23-7,2-8,4	33,9	E5-14,4-15,6	32,7	E7-10,8-12,0	33,4		
N1-2,4-3,6	29,8	N4-8,4-9,6	28,4	N6-16,8-18,0	29,9	N8-16,8-18,0	31,1	N11-6,0-7,2	36,1	N14-18,0-19,2	18,4	N16-20,4-21,6	34,6	N18-19,2-20,4	36,8	N21-0-1,2	34,1	N23-8,4-9,6	36,4	E5-15,6-16,8	28,6	E7-12,0-13,2	35,5		
N1-3,6-4,8	28,5	N4-9,6-10,8	27,5	N6-18,0-19,2	33,0	N8-18,0-19,2	33,0	N11-7,2-8,4	33,9	N15-0-1,2	34,0	N16-21,6-22,8	34,8	N18-20,4-21,6	36,9	N21-1,2-2,4	35,0	N23-9,6-10,8	30,0	E5-16,8-18,0	32,1	E7-13,2-14,4	33,9		
N1-4,8-6,0	35,6	N4-10,8-12,0	28,2	N6-19,2-20,4	32,7	N8-19,2-20,4	32,2	N11-8,4-9,6	34,3	N15-1,2-2,4	33,4	N16-22,8-24,0	32,9	N18-21,6-22,8	35,3	N21-2,4-3,6	34,8	N23-10,8-12,0	29,2	E5-18,0-19,2	30,6	E7-14,4-15,6	35,4		
N1-6,0-7,2	31,6	N4-12,0-13,2	23,6	N6-20,4-21,6	33,6	N8-20,4-21,6	35,8	N11-9,6-10,8	35,3	N15-2,4-3,6	34,7	N17-0-1,2	34,8	N18-22,8-24,0	38,7	N21-3,6-4,8	35,2	N23-12,0-13,2	36,2	E5-19,2-20,4	20,4	E7-15,6-16,8	35,5		
N1-7,2-8,4	25,6	N4-13,2-14,4	29,7	N6-21,6-22,8	21,8	N8-21,6-22,8	23,9	N11-10,8-12,0	35,0	N15-3,6-4,8	33,3	N17-1,2-2,4	34,8	N18-24,0-25,2	19,3	N21-4,8-6,0	35,0	N23-13,2-14,4	36,6	E5-20,4-21,6	33,1	E7-16,8-18,0	34,9		
N1-8,4-9,6	23,4	N4-14,4-15,6	29,6	N7-0-1,2	33,9	N9-0-1,2	32,7	N11-12,0-13,2	34,8	N15-4,8-6,0	34,7	N17-2,4-3,6	35,5	N19-0-1,2	34,9	N21-6,0-7,2	32,0	N23-14,4-15,6	33,9	E5-21,6-22,8	32,2	E7-18,0-19,2	33,9		
N1-9,6-10,8	24,9	N4-15,6-16,8	23,1	N7-1,2-2,4	32,2	N9-1,2-2,4	35,3	N11-13,2-14,4	33,9	N15-6,0-7,2	34,7	N17-3,6-4,8	34,6	N19-1,2-2,4	34,1	N21-7,2-8,4	37,3	E2-0-1,2	33,0	E5-22,8-24,0	31,9	E7-19,2-20,4	36,0		
N1-10,8-12,0	26,8	N4-16,8-18,0	22,7	N7-2,4-3,6	31,0	N9-2,4-3,6	35,5	N11-14,4-15,6	39,3	N15-7,2-8,4	34,1	N17-4,8-6,0	34,4	N19-2,4-3,6	32,7	N21-8,4-9,6	34,6	E2-1,2-2,4	33,7	E5-24,0-25,2	31,8	E7-20,4-21,6	33,6		
N1-12,0-13,2	18,2	N5-0-1,2	34,5	N7-3,6-4,8	30,2	N9-3,6-4,8	34,3	N11-15,6-16,8	35,0	N15-8,4-9,6	35,0	N17-6,0-7,2	33,4	N19-3,6-4,8	35,0	N21-9,6-10,8	33,6	E2-2,4-3,6	32,2	E6-0-1,2	34,0	E7-21,6-22,8	34,1		
N2-0-1,2	32,7	N5-1,2-2,4	32,7	N7-4,8-6,0	28,4	N9-4,8-6,0	35,3	N11-16,8-18,0	32,5	N15-9,6-10,8	36,6	N17-7,2-8,4	35,2	N19-4,8-6,0	37,2	N21-10,8-12,0	32,9	E2-3,6-4,8	16,7	E6-1,2-2,4	34,3	E7-22,8-24,0	35,0		
N2-1,2-2,4	33,2	N5-2,4-3,6	30,9	N7-6,0-7,2	32,7	N9-6,0-7,2	32,0	N12-0-1,2	35,1	N15-10,8-12,0	34,6	N17-8,4-9,6	36,0	N19-6,0-7,2	37,3	N21-12,0-13,2	35,5	E3-0-1,2	33,9	E6-2,4-3,6	31,0	E7-24,0-25,2	15,8		
N2-2,4-3,6	24,8	N5-3,6-4,8	31,5	N7-7,2-8,4	32,0	N9-7,2-8,4	34,4	N12-1,2-2,4	35,1	N15-12,0-13,2	35,0	N17-9,6-10,8	37,0	N19-7,2-8,4	35,2	N21-13,2-14,4	31,5	E3-1,2-2,4	32,0	E6-3,6-4,8	32,0	E8-0-1,2	34,8		
N2-3,6-4,8	26,9	N5-4,8-6,0	30,4	N7-8,4-9,6	28,7	N9-8,4-9,6	35,6	N12-2,4-3,6	35,0	N15-13,2-14,4	34,4	N17-10,8-12,0	36,9	N19-8,4-9,6	35,3	N21-14,4-15,6	33,8	E3-2,4-3,6	33,4	E6-4,8-6,0	33,9	E8-1,2-2,4	34,4		
N2-4,8-6,0	26,2	N5-6,0-7,2	31,3	N7-9,6-10,8	30,1	N9-9,6-10,8	33,3	N12-3,6-4,8	34,7	N15-14,4-15,6	34,7	N17-12,0-13,2	33,8	N19-9,6-10,8	34,5	N21-15,6-16,8	33,3	E3-3,6-4,8	35,3	E6-6,0-7,2	32,5	E8-2,4-3,6	34,8		
N2-6,0-7,2	21,5	N5-7,2-8,4	28,0	N7-10,8-12,0	32,9	N9-10,8-12,0	34,8	N12-4,8-6,0	36,3	N15-15,6-16,8	34,7	N17-13,2-14,4	34,1	N19-10,8-12,0	33,8	N21-16,8-18,0	32,2	E3-4,8-6,0	34,3	E6-7,2-8,4	32,0	E8-3,6-4,8	35,4		
N2-7,2-8,4	25,4	N5-8,4-9,6	28,0	N7-12,0-13,2	32,7	N9-12,0-13,2	34,1	N12-6,0-7,2	36,8	N15-16,8-18,0	35,0	N17-14,4-15,6	34,7	N19-12,0-13,2	34,0	N21-18,0-19,2	17,2	E3-6,0-7,2	34,5	E6-8,4-9,6	33,3	E8-4,8-6,0	35,0		
N2-8,4-9,6	26,9	N5-9,6-10,8	25,3	N7-13,2-14,4	29,8	N9-13,2-14,4	30,2	N12-7,2-8,4	33,2	N15-18,0-19,2	35,1	N17-15,6-16,8	33,8	N19-13,2-14,4	34,7	N22-0-1,2	34,4	E3-7,2-8,4	33,9	E6-9,6-10,8	31,9	E8-6,0-7,2	35,0		
N2-9,6-10,8	24,9	N5-10,8-12,0	31,3	N7-14,4-15,6	29,9	N9-14,4-15,6	32,9	N12-8,4-9,6	36,3	N15-19,2-20,4	36,4	N17-16,8-18,0	33,3	N19-14,4-15,6	36,4	N22-1,2-2,4	35,5	E3-8,4-9,6	15,0	E6-10,8-12,0	32,0	E8-7,2-8,4	34,7		
N2-10,8-12,0	32,2	N5-12,0-13,2	31,5	N7-15,6-16,8	28,5	N9-15,6-16,8	31,4	N12-9,6-10,8	36,3	N15-20,4-21,6	36,0	N17-18,0-19,2	34,6	N19-15,6-16,8	34,1	N22-2,4-3,6	33,3	E4-0-1,2	32,1	E6-12,0-13,2	34,1	E8-8,4-9,6	35,1		
N2-12,0-13,2	14,1	N5-13,2-14,4	29,2	N7-16,8-18,0	27,8	N9-16,8-18,0	30,8	N12-10,8-12,0	34,7	N15-21,6-22,8	34,5	N17-19,2-20,4	34,3	N19-16,8-18,0	33,5	N22-3,6-4,8	36,4	E4-1,2-2,4	34,6	E6-13,2-14,4	33,1	E8-9,6-10,8	34,0		
N3-0-1,2	32,2	N5-14,4-15,6	30,6	N7-18,0-19,2	32,5	N9-18,0-19,2	28,5	N12-12,0-13,2	36,4	N15-22,8-24,0	34,7	N17-20,4-21,6	35,5	N19-18,0-19,2	35,1	N22-4,8-6,0	35,5	E4-2,4-3,6	31,1	E6-14,4-15,6	34,8	E8-10,8-12,0	34,8		
N3-1,2-2,4	31,9	N5-15,6-16,8	33,3	N7-19,2-20,4	32,8	N10-0-1,2	33,0	N12-13,2-14,4	33,8	N15-24,0-25,2	35,0	N17-21,6-22,8	35,1	N19-19,2-20,4	34,2	N22-6,0-7,2	34,2	E4-3,6-4,8	30,1	E6-15,6-16,8	36,3	E8-12,0-13,2	34,3		
N3-2,4-3,6	24,6	N5-16,8-18,0	33,0	N7-20,4-21,6	32,7	N10-1,2-2,4	33,5	N12-14,4-15,6	36,4	N15-25,2-26,4	17,2	N17-22,8-24,0	34,8	N19-20,4-21,6	36,0	N22-7,2-8,4	34,2	E4-4,8-6,0	30,5	E6-16,8-18,0	31,5	E8-13,2-14,4	34,3		
N3-3,6-4,8	35,3	N5-18,0-19,2	31,3	N7-21,6-22,8	31,9	N10-2,4-3,6	34,8	N12-15,6-16,8	36,2	N16-0-1,2	34,6	N17-24,0-25,2	18,7	N19-21,6-22,8	24,1	N22-8,4-9,6	34,1	E4-6,0-7,2	31,6	E6-18,0-19,2	32,9	E8-14,4-15,6	34,1		
N3-4,8-6,0	33,3	N5-19,2-20,4	31,8	N7-22,8-24,0	33,8	N10-3,6-4,8	35,0	N12-16,8-18,0	33,2	N16-1,2-2,4	35,6	N18-0-1,2	36,0	N20-0-1,2	35,4	N22-9,6-10,8	32,9	E4-7,2-8,4	31,4	E6-19,2-20,4	36,2	E8-15,6-16,8	34,8		
N3-6,0-7,2	26,6	N5-20,4-21,6	18,4	N7-24,0-25,2	35,5	N10-4,8-6,0	34,7	N14-0-1,2	33,5	N16-2,4-3,6	33,5	N18-1,2-2,4	36,2	N20-1,2-2,4	34,9	N22-10,8-12,0	33,8	E4-8,4-9,6	35,7	E6-20,4-21,6	33,8	E8-16,8-18,0	35,0		
N3-7,2-8,4	25,7	N6-0-1,2	35,5	N8-0-1,2	34,0	N10-6,0-7,2	34,6	N14-1,2-2,4	34,3	N16-3,6-4,8	34,0	N18-2,4-3,6	34,8	N20-2,4-3,6	33,9	N22-12,0-13,2	33,7	E4-9,6-10,8	26,4	E6-21,6-22,8	35,8	E8-18,0-19,2	35,7		
N3-8,4-9,6	29,0	N6-1,2-2,4	32,6	N8-1,2-2,4	30,4	N10-7,2-8,4	33,9	N14-2,4-3,6	33,6	N16-4,8-6,0	34,7	N18-3,6-4,8	36,1	N20-3,6-4,8	37,1	N22-13,2-14,4	38,1	E5-0-1,2	31,0	E6-22,8-24,0	33,9	E8-19,2-20,4	36,0		
N3-9,6-10,8	22,9	N6-2,4-3,6	34,3	N8-2,4-3,6	33,9	N10-8,4-9,6	33,4	N14-3,6-4,8	33,8	N16-6,0-7,2	35,3	N18-4,8-6,0	35,5	N20-4,8-6,0	37,3	N22-14,4-15,6	35,0	E5-1,2-2,4	29,0	E6-24,0-25,2	34,6	E8-20,4-21,6	37,1		
N3-10,8-12,0	25,9	N6-3,6-4,8	35,0	N8-3,6-4,8	32,2	N10-9,6-10,8	33,6	N14-4,8-6,0	35,0	N16-7,2-8,4	34,0	N18-6,0-7,2	35,3	N20-6,0-7,2	36,8	N22-15,6-16,8	33,9	E5-2,4-3,6	31,5	E6-25,2-26,4	18,2	E8-21,6-22,8	32,7		
N3-12,0-13,2	28,7	N6-4,8-6,0	30,3	N8-4,8-6,0	29,5	N10-10,8-12,0	34,8	N14-6,0-7,2	33,4	N16-8,4-9,6	31,8	N18-7,2-8,4	35,8	N20-7,2-8,4	33,8	N22-16,8-18,0	34,1	E5-3,6-4,8	32,3	E7-0-1,2	34,8	E8-22,8-24,0	12,3		
N3-13,2-14,4	33,3	N6-6,0-7,2	27,2	N8-6,0-7,2	30,8	N10-12,0-13,2	33,6	N14-7,2-8,4	35,7	N16-9,6-10,8	36,4	N18-8,4-9,6	34,8	N20-8,4-9,6	34,0	N22-18,0-19,2	31,3	E5-4,8-6,0	29,2	E7-1,2-2,4	32,4	E9-0-1,2	33,7		
N3-14,4-15,6	13,5	N6-7,2-8,4	32,2	N8-7,2-8,4	32,6	N10-13,2-14,4																			

Com o intuito de confirmar que a média amostral é representativa em relação à média populacional, foi estudada a inferência estatística através do teste de hipóteses. Para a concentração de níquel foram definidas duas hipóteses, sendo a hipótese nula ($H_0: \mu = 33,31$) e a hipótese alternativa ($H_1: \mu \neq 33,31$). Para este teste de hipóteses foi aplicado o nível de significância (α) de 5% ou 0,05 e como o P-value calculado foi de 0,485, que é maior que o valor do nível de significância, aceita-se a hipótese nula. Isto é representado graficamente, através da figura 76, onde o H_0 não está na região crítica indicando que o P-value é maior que α , assim a média amostral pode ser aplicada como a média populacional.

Figura 76 - “Boxplot” com teste de hipóteses para os teores de Fe.

5.1.5 Concentração de magnésio

As concentrações de magnésio das 482 amostras são demonstradas na tabela 24.

Nas figuras 77 e 78 são apresentados o histograma e “boxplot” dos valores correspondentes às concentrações de magnésio nas amostras de rejeito Caron. Os valores da média e desvio padrão são 6,351 e 1,488, respectivamente, enquanto o primeiro e terceiro quartis, mediana e valores máximo e mínimo que são 5,36, 6,92, 5,83, 12,65 e 3,62% Mg, respectivamente.

Figura 77 - Histograma das concentrações de magnésio nas amostras de rejeito Caron.

Figura 78 - “Boxplot” das concentrações de magnésio nas amostras de rejeito Caron.

Com o intuito de confirmar que a média amostral é representativa em relação à média populacional, foi estudada a inferência estatística através do teste de hipóteses. Para a concentração de níquel foram definidas duas hipóteses, sendo a hipótese nula ($H_0: \mu = 6,351$) e a hipótese alternativa ($H_1: \mu \neq 6,351$). Para este teste de hipóteses foi aplicado o nível de significância (α) de 5% ou 0,05 e como o P-value calculado foi de 0,502, que é maior que o valor do nível de significância, aceita-se a hipótese nula. Isto é representado graficamente, através da figura 79, onde o H_0 não está na região crítica indicando que o P-value é maior que α , assim a média amostral pode ser aplicada como a média populacional.

Tabela 24 - Concentrações de magnésio nas amostras de rejeito Caron.

	Concentração de Mg (%)		Amostra		Concentração de Mg (%)		Amostra		Concentração de Mg (%)		Amostra		Concentração de Mg (%)		Amostra		Concentração de Mg (%)		Amostra		Concentração de Mg (%)		Amostra		Concentração de Mg (%)		Amostra		Concentração de Mg (%)		Amostra		Concentração de Mg (%)		Amostra		Concentração de Mg (%)				
N0-0-1,2	5,8	N4-0-1,2	4,8	N6-8-4-9,6	12,0	N8-8-4-9,6	6,8	N10-14-4-15,6	5,8	N14-9-6-10,8	5,5	N16-12-0-13,2	6,5	N18-10-8-12,0	5,7	N20-10-8-12,0	5,0	N23-0-1,2	5,3	E5-7,2-8,4	7,9	E7-3-6-4,8	5,5	E9-2-4-3,6	5,9																
N0-1,2-2,4	5,2	N4-1,2-2,4	5,7	N6-9-6-10,8	10,0	N8-9-6-10,8	7,1	N10-15,6-16,8	4,1	N14-10-8-12,0	5,1	N16-13,2-14,4	6,3	N18-12,0-13,2	5,7	N20-12,0-13,2	5,2	N23-1,2-2,4	3,6	E5-8-4-9,6	8,1	E7-4-8-6,0	6,0	E9-3,6-4,8	5,7																
N0-2,4-3,6	5,8	N4-2,4-3,6	5,8	N6-10-8-12,0	9,1	N8-10,8-12,0	8,6	N11-0-1,2	4,9	N14-12,0-13,2	5,6	N16-14,4-15,6	6,1	N18-13,2-14,4	5,6	N20-13,2-14,4	5,7	N23-2,4-3,6	6,5	E5-9-6-10,8	6,5	E7-6,0-7,2	5,5	E9-4,8-6,0	4,4																
N0-3,6-4,8	4,8	N4-3,6-4,8	6,0	N6-12,0-13,2	5,0	N8-12,0-13,2	9,4	N11-1,2-2,4	5,1	N14-13,2-14,4	6,3	N16-15,6-16,8	5,5	N18-14,4-15,6	5,5	N20-14,4-15,6	5,2	N23-3,6-4,8	6,9	E5-10,8-12,0	8,0	E7-7,2-8,4	5,4																		
N0-4,8-6,0	2,7	N4-4,8-6,0	5,5	N6-13,2-14,4	9,5	N8-13,2-14,4	10,5	N11-2,4-3,6	3,9	N14-14,4-15,6	5,8	N16-16,8-18,0	5,7	N18-15,6-16,8	5,3	N20-15,6-16,8	5,1	N23-4,8-6,0	4,4	E5-12,0-13,2	7,0	E7-8,4-9,6	5,3																		
N1-0-1,2	6,7	N4-6,0-7,2	9,5	N6-14-4-15,6	8,7	N8-14-4-15,6	8,6	N11-3,6-4,8	5,2	N14-15,6-16,8	6,3	N16-18,0-19,2	4,9	N18-16,8-18,0	5,3	N20-16,8-18,0	5,4	N23-6,0-7,2	6,3	E5-13,2-14,4	7,1	E7-9,6-10,8	5,5																		
N1-1,2-2,4	6,8	N4-7,2-8,4	7,6	N6-15,6-16,8	6,9	N8-15,6-16,8	8,4	N11-4,8-6,0	5,3	N14-16,8-18,0	5,2	N16-19,2-20,4	5,0	N18-18,0-19,2	5,5	N20-18,0-19,2	1,1	N23-7,2-8,4	6,9	E5-14,4-15,6	6,2	E7-10,8-12,0	5,8																		
N1-2,4-3,6	6,9	N4-8,4-9,6	7,0	N6-16,8-18,0	9,3	N8-16,8-18,0	8,5	N11-6,0-7,2	4,8	N14-18,0-19,2	1,9	N16-20,4-21,6	5,6	N18-19,2-20,4	5,3	N21-0-1,2	6,2	N23-8-4-9,6	7,1	E5-15,6-16,8	9,9	E7-12,0-13,2	5,1																		
N1-3,6-4,8	7,7	N4-9,6-10,8	8,7	N6-18,0-19,2	7,8	N8-18,0-19,2	5,9	N11-7,2-8,4	5,2	N15-0-1,2	5,3	N16-21,6-22,8	5,6	N18-20,4-21,6	6,0	N21-1,2-2,4	5,4	N23-9,6-10,8	4,5	E5-16,8-18,0	6,3	E7-13,2-14,4	5,7																		
N1-4,8-6,0	5,8	N4-10,8-12,0	10,3	N6-19,2-20,4	7,5	N8-19,2-20,4	6,4	N11-8,4-9,6	5,2	N15-1,2-2,4	5,6	N16-22,8-24,0	4,2	N18-21,6-22,8	5,3	N21-2,4-3,6	5,5	N23-10,8-12,0	4,5	E5-18,0-19,2	7,9	E7-14,4-15,6	5,3																		
N1-6,0-7,2	7,3	N4-12,0-13,2	12,3	N6-20,4-21,6	7,1	N8-20,4-21,6	4,9	N11-9,6-10,8	5,2	N15-2,4-3,6	5,5	N17-0-1,2	5,9	N18-22,8-24,0	5,0	N21-3,6-4,8	5,1	N23-12,0-13,2	3,7	E5-19,2-20,4	3,8	E7-15,6-16,8	5,2																		
N1-7,2-8,4	9,9	N4-13,2-14,4	8,9	N6-21,6-22,8	2,5	N8-21,6-22,8	6,9	N11-10,8-12,0	5,1	N15-3,6-4,8	5,5	N17-1,2-2,4	5,6	N18-24,0-25,2	1,9	N21-4,8-6,0	5,5	N23-13,2-14,4	3,6	E5-20,4-21,6	6,5	E7-16,8-18,0	5,5																		
N1-8,4-9,6	11,2	N4-14,4-15,6	8,9	N7-0-1,2	5,6	N9-0-1,2	6,2	N11-12,0-13,2	5,3	N15-4,8-6,0	5,8	N17-2,4-3,6	5,5	N19-0-1,2	6,5	N21-6,0-7,2	7,2	N23-14,4-15,6	5,9	E5-21,6-22,8	4,8	E7-18,0-19,2	5,4																		
N1-9,6-10,8	12,0	N4-15,6-16,8	1,1	N7-1,2-2,4	5,9	N9-1,2-2,4	5,1	N11-13,2-14,4	5,4	N15-6,0-7,2	5,1	N17-3,6-4,8	5,6	N19-1,2-2,4	6,1	N21-7,2-8,4	4,8	E2-0-1,2	6,4	E5-22,8-24,0	5,1	E7-19,2-20,4	5,4																		
N1-10,8-12,0	7,5	N4-16,8-18,0	1,3	N7-2,4-3,6	6,3	N9-2,4-3,6	4,8	N11-14,4-15,6	3,7	N15-7,2-8,4	5,5	N17-4,8-6,0	6,1	N19-2,4-3,6	6,1	N21-8-4-9,6	6,5	E2-1,2-2,4	5,7	E5-24,0-25,2	5,3	E7-20,4-21,6	5,9																		
N1-12,0-13,2	1,4	N5-0-1,2	5,1	N7-3,6-4,8	7,4	N9-3,6-4,8	5,5	N11-15,6-16,8	5,1	N15-8-4-9,6	5,4	N17-6,0-7,2	7,1	N19-3,6-4,8	5,5	N21-9,6-10,8	6,9	E2-2,4-3,6	7,0	E6-0-1,2	6,2	E7-21,6-22,8	5,5																		
N2-0-1,2	5,8	N5-1,2-2,4	5,3	N7-4,8-6,0	8,2	N9-4,8-6,0	4,8	N11-16,8-18,0	3,1	N15-9,6-10,8	4,6	N17-7,2-8,4	5,7	N19-4,8-6,0	5,9	N21-10,8-12,0	6,9	E2-3,6-4,8	1,5	E6-1,2-2,4	5,5	E7-22,8-24,0	5,7																		
N2-1,2-2,4	5,2	N5-2,4-3,6	5,8	N7-6,0-7,2	5,4	N9-6,0-7,2	5,7	N12-0-1,2	5,0	N15-10,8-12,0	5,0	N17-8,4-9,6	5,6	N19-6,0-7,2	5,2	N21-12,0-13,2	6,4	E3-0-1,2	5,9	E6-2,4-3,6	7,2	E7-24,0-25,2	1,7																		
N2-2,4-3,6	10,4	N5-3,6-4,8	7,0	N7-7,2-8,4	5,4	N9-7,2-8,4	5,3	N12-1,2-2,4	4,9	N15-12,0-13,2	5,3	N17-9,6-10,8	5,5	N19-7,2-8,4	6,2	N21-13,2-14,4	7,1	E3-1,2-2,4	6,6	E6-3,6-4,8	6,4	E8-0-1,2	5,7																		
N2-3,6-4,8	8,7	N5-4,8-6,0	7,3	N7-8-4-9,6	8,0	N9-8-4-9,6	4,7	N12-2,4-3,6	5,2	N15-13,2-14,4	5,2	N17-10,8-12,0	5,8	N19-8-4-9,6	6,6	N21-14,4-15,6	5,9	E3-2,4-3,6	6,5	E6-4,8-6,0	6,3	E8-1,2-2,4	5,5																		
N2-4,8-6,0	10,7	N5-6,0-7,2	6,5	N7-9,6-10,8	8,1	N9-9,6-10,8	5,3	N12-3,6-4,8	5,2	N15-14,4-15,6	5,6	N17-12,0-13,2	6,0	N19-9,6-10,8	6,5	N21-15,6-16,8	6,9	E3-3,6-4,8	5,4	E6-6,0-7,2	6,2	E8-2,4-3,6	5,7																		
N2-6,0-7,2	12,7	N5-7,2-8,4	8,6	N7-10,8-12,0	7,0	N9-10,8-12,0	4,9	N12-4,8-6,0	5,0	N15-15,6-16,8	5,6	N17-13,2-14,4	6,1	N19-10,8-12,0	7,1	N21-16,8-18,0	6,3	E3-4,8-6,0	5,7	E6-7,2-8,4	6,9	E8-3,6-4,8	5,2																		
N2-7,2-8,4	9,6	N5-8-4-9,6	10,4	N7-12,0-13,2	7,5	N9-12,0-13,2	5,1	N12-6,0-7,2	4,9	N15-16,8-18,0	5,8	N17-14,4-15,6	6,4	N19-12,0-13,2	7,1	N21-18,0-19,2	1,8	E3-6,0-7,2	5,7	E6-8-4-9,6	7,0	E8-4,8-6,0	5,6																		
N2-8,4-9,6	9,2	N5-9,6-10,8	11,1	N7-13,2-14,4	8,2	N9-13,2-14,4	7,1	N12-7,2-8,4	6,1	N15-18,0-19,2	6,3	N17-15,6-16,8	6,4	N19-13,2-14,4	7,4	N22-0-1,2	6,4	E3-7,2-8,4	5,6	E6-9,6-10,8	6,7	E8-6,0-7,2	5,3																		
N2-9,6-10,8	12,3	N5-10,8-12,0	8,2	N7-14,4-15,6	8,1	N9-14,4-15,6	6,9	N12-8-4-9,6	4,8	N15-19,2-20,4	5,7	N17-16,8-18,0	6,2	N19-14,4-15,6	7,1	N22-1,2-2,4	5,3	E3-8,4-9,6	1,2	E6-10,8-12,0	6,6	E8-7,2-8,4	5,5																		
N2-10,8-12,0	8,2	N5-12,0-13,2	8,1	N7-15,6-16,8	9,5	N9-15,6-16,8	7,5	N12-9,6-10,8	4,7	N15-20,4-21,6	5,3	N17-18,0-19,2	6,3	N19-15,6-16,8	6,7	N22-2,4-3,6	6,5	E4-0-1,2	6,8	E6-12,0-13,2	6,1	E8-8-4-9,6	5,0																		
N2-12,0-13,2	1,0	N5-13,2-14,4	8,8	N7-16,8-18,0	9,7	N9-16,8-18,0	7,4	N12-10,8-12,0	5,2	N15-21,6-22,8	6,2	N17-19,2-20,4	6,3	N19-16,8-18,0	6,2	N22-3,6-4,8	5,6	E4-1,2-2,4	5,8	E6-13,2-14,4	6,5	E8-9,6-10,8	6,1																		
N3-0-1,2	5,6	N5-14,4-15,6	9,5	N7-18,0-19,2	7,3	N9-18,0-19,2	4,0	N12-12,0-13,2	4,9	N15-22,8-24,0	5,7	N17-20,4-21,6	5,5	N19-18,0-19,2	6,7	N22-4,8-6,0	5,5	E4-2,4-3,6	6,6	E6-14,4-15,6	6,0	E8-10,8-12,0	5,4																		
N3-1,2-2,4	5,8	N5-15,6-16,8	7,8	N7-19,2-20,4	8,5	N10-0-1,2	5,8	N12-13,2-14,4	5,2	N15-24,0-25,2	5,9	N17-21,6-22,8	5,8	N19-19,2-20,4	7,0	N22-6,0-7,2	6,5	E4-3,6-4,8	8,0	E6-15,6-16,8	5,3	E8-12,0-13,2	6,1																		
N3-2,4-3,6	10,4	N5-16,8-18,0	7,7	N7-20,4-21,6	8,0	N10-1,2-2,4	5,4	N12-14,4-15,6	4,9	N15-25,2-26,4	1,8	N17-22,8-24,0	5,8	N19-20,4-21,6	6,7	N22-7,2-8,4	6,7	E4-4,8-6,0	8,1	E6-16,8-18,0	7,3	E8-13,2-14,4	5,4																		
N3-3,6-4,8	5,0	N5-18,0-19,2	7,9	N7-21,6-22,8	7,6	N10-2,4-3,6	4,7	N12-15,6-16,8	4,8	N16-0-1,2	5,8	N17-24,0-25,2	1,4	N19-21,6-22,8	3,0	N22-8-4-9,6	6,3	E4-6,0-7,2	6,6	E6-18,0-19,2	6,5	E8-14,4-15,6	5,4																		
N3-4,8-6,0	5,3	N5-19,2-20,4	7,4	N7-22,8-24,0	6,7	N10-3,6-4,8	5,0	N12-16,8-18,0	4,4	N16-1,2-2,4	5,5	N18-0-1,2	5,5	N20-0-1,2	5,5	N22-9,6-10,8	6,9	E4-7,2-8,4	7,2	E6-19,2-20,4	5,4	E8-15,6-16,8	5,4																		
N3-6,0-7,2	10,3	N5-20,4-21,6	1,7	N7-24,0-25,2	6,2	N10-4,8-6,0	4,9	N14-0-1,2	5,5	N16-2,4-3,6	6,5	N18-1,2-2,4	5,2	N20-1,2-2,4	5,8	N22-10,8-12,0	6,6	E4-8-4-9,6	5,1	E6-20,4-21,6	6,4	E8-16,8-18,0	5,4																		
N3-7,2-8,4	10,0	N6-0-1,2	4,9	N8-0-1,2	5,4	N10-6,0-7,2	5,3	N14-1,2-2,4	5,5	N16-3,6-4,8	5,7	N18-2,4-3,6	5,9	N20-2,4-3,6	5,9	N22-12,0-13,2	6,6	E4-9,6-10,8	4,0	E6-21,6-22,8	5,6	E8-18,0-19,2	5,4																		
N3-8,4-9,6	7,6	N6-1,2-2,4	5,5	N8-1,2-2,4	6,4	N10-7,2-8,4	5,7	N14-2,4-3,6	5,7	N16-4,8-6,0	5,5	N18-3,6-4,8	5,2	N20-3,6-4,8	5,3	N22-13,2-14,4	4,7	E5-0-1,2	6,6	E6-22,8-24,0	6,3	E8-19,2-20,4	5,5																		

Figura 79 - “Boxplot” com teste de hipóteses para os teores de Mg.

5.1.3 Granulometria

Para a determinação da granulometria das amostras, foram utilizadas somente algumas destas para análise. Foram definidos aleatoriamente os furos N2, N5, N8, N11, N14, N17, N20, N23, E3, E5, E7 e E9, para serem avaliados. Como se trata de um produto de processo industrial, não mais de um minério, julgamos que as características sejam mais homogêneas que aquelas de uma matéria-prima natural. Para cada furo foram confeccionados gráficos apresentando a porcentagem passante acumulada para cada seção dos furos, assim como o valor do d_{90} , que é o valor do tamanho da partícula correspondente 90% passante, ou seja, 90% das partículas são menores que o d_{90} (GOMIDE, 1983). Os pontos em vermelho, conectados às linhas tracejadas correspondem aos valores do d_{90} .

Na tabela 25 são apresentados os valores das porcentagens do material passante acumuladas para as amostras que compõem o furo N2 e na figura 80 é apresentado de forma gráfica os resultados obtidos. Os valores do d_{90} variam entre 28 e 80 μm .

Tabela 25 - Porcentagem passante acumulada das amostras que compõem o furo N2.

Malha		Amostra										
(mm)	Série Tyler	N2-0-1,2	N2-1,2-2,4	N2-2,4-3,6	N2-3,6-4,8	N2-4,8-6,0	N2-6,0-7,2	N2-7,2-8,4	N2-8,4-9,6	N2-9,6-10,8	N2-10,8-12,0	N2-12,0-13,2
0,037	400	35,6	35,8	21,0	26,6	19,2	19,4	20,4	18,7	18,7	32,3	15,9
0,045	325	42,1	42,3	24,6	31,7	22,5	23,0	23,8	21,7	22,2	38,8	19,2
0,053	270	49,2	49,4	28,6	37,4	26,3	27,1	27,8	25,1	26,3	46,2	23,2
0,063	250	55,9	56,2	32,6	42,9	30,1	31,2	31,6	28,4	30,4	53,4	27,3
0,074	200	62,0	62,4	36,4	48,0	33,8	35,1	35,4	31,6	34,4	60,1	31,4
0,090	170	68,3	68,9	40,6	53,4	38,1	39,4	39,8	35,4	39,1	67,2	36,0
0,104	150	74,1	75,0	45,1	58,8	42,9	43,8	44,6	39,5	44,2	73,9	40,9
0,125	115	79,3	80,3	49,6	63,9	48,0	48,3	49,9	44,0	49,5	79,7	45,9
0,150	100	83,8	84,9	54,4	68,8	53,5	52,8	55,6	49,0	55,1	84,7	50,8
0,180	80	87,5	88,7	59,5	73,4	59,4	57,6	61,8	54,5	60,7	88,6	55,6
0,212	65	90,6	91,6	65,0	77,9	65,6	62,7	68,3	60,5	66,4	91,7	60,4
0,250	60	93,1	94,0	70,8	82,4	72,1	68,3	75,0	67,0	72,1	94,0	65,4
0,300	48	95,2	95,7	76,9	86,7	78,5	74,2	81,4	73,6	77,6	95,6	70,4
0,355	42	96,7	97,0	82,9	90,6	84,6	80,2	87,4	80,1	82,8	96,8	75,6
0,425	35	97,9	97,8	88,2	93,9	89,9	85,8	92,2	85,9	87,5	97,7	80,8
0,500	32	98,8	98,5	92,9	96,6	94,2	90,9	96,0	90,9	91,6	98,3	86,1
0,600	28	99,3	99,0	96,4	98,4	97,3	94,9	98,5	94,8	95,0	98,9	91,0
0,710	24	99,7	99,4	98,6	99,5	99,2	97,8	99,7	97,7	97,5	99,4	95,1
0,850	20	99,9	99,8	99,7	99,9	99,9	99,5	100,0	99,4	99,2	99,8	98,4
1,000	16	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,200	14	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,420	12	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,700	10	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,000	9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Figura 80 - Porcentagem passante acumulada para cada amostra que compõem o furo N2.

Na tabela 26 são apresentados os valores das porcentagens do material passante acumuladas para as amostras que compõem o furo N5 e na figura 81 é apresentado de forma gráfica os resultados obtidos. Os valores do d_{90} variam entre 28 e 80 μm .

Figura 81 - Porcentagem passante acumulada para cada amostra que compõem o furo N5.

Na tabela 27 são apresentados os valores das porcentagens do material passante acumuladas para as amostras que compõem o furo N8 e na figura 82 é apresentado de forma gráfica os resultados obtidos. Os valores do d_{90} variam entre 48 e 80 μm .

Tabela 26 - Porcentagem passante acumulada das amostras que compõem o furo N5.

Malha		Amostra																	
(mm)	Série Tyler	N5-0-1,2	N5-1,2-2,4	N5-2,4-3,6	N5-3,6-4,8	N5-4,8-6,0	N5-6,0-7,2	N5-7,2-8,4	N5-8,4-9,6	N5-9,6-10,8	N5-10,8-12,0	N5-12,0-13,2	N5-13,2-14,4	N5-14,4-15,6	N5-15,6-16,8	N5-16,8-18,0	N5-18,0-19,2	N5-19,2-20,4	N5-20,4-21,6
0,037	400	36,5	35,0	35,5	27,6	24,0	26,8	33,1	27,7	21,5	33,0	29,6	31,8	20,4	19,5	19,4	20,6	36,7	15,7
0,045	325	42,9	41,2	41,9	32,6	28,4	31,5	39,0	32,7	25,3	38,5	35,4	37,8	23,5	22,4	22,4	23,9	43,3	18,7
0,053	270	50,0	48,1	49,1	38,1	33,4	36,9	45,5	38,5	29,7	44,5	42,3	44,5	26,9	25,9	26,0	27,8	50,7	22,3
0,063	250	56,8	54,7	56,0	43,5	38,1	42,2	51,6	44,1	34,2	50,1	49,1	50,7	30,4	29,7	29,8	32,0	57,7	25,9
0,074	200	63,1	60,9	62,4	48,7	42,6	47,4	57,2	49,6	38,8	55,4	55,7	56,4	34,0	34,0	34,1	36,6	64,1	29,5
0,090	170	69,6	67,3	69,0	54,3	47,3	53,2	63,1	55,8	44,4	61,0	62,9	62,3	38,5	39,7	39,5	42,5	70,8	33,6
0,104	150	75,8	73,4	75,2	59,9	52,0	59,4	68,7	62,1	50,6	66,4	69,9	67,9	43,8	46,5	46,2	49,4	77,0	38,0
0,125	115	81,3	78,8	80,7	65,3	56,3	65,5	73,8	68,2	57,3	71,5	76,2	73,0	49,9	54,3	53,6	57,0	82,4	42,5
0,150	100	86,1	83,5	85,3	70,5	60,4	71,6	78,4	74,2	64,3	76,3	81,8	77,7	56,7	62,8	61,8	65,1	87,0	47,3
0,180	80	90,1	87,4	89,0	75,4	64,3	77,3	82,4	79,6	71,2	80,5	86,5	82,1	64,0	71,3	69,9	73,0	90,7	52,1
0,212	65	93,3	90,5	91,9	80,0	68,2	82,6	86,0	84,6	77,7	84,2	90,3	86,1	71,4	79,2	77,7	80,3	93,7	57,0
0,250	60	95,8	93,1	94,3	84,4	72,4	87,3	89,3	89,0	83,9	87,5	93,5	89,9	78,8	86,3	84,7	86,7	96,0	62,4
0,300	48	97,6	95,2	96,0	88,5	76,8	91,3	92,2	92,6	89,1	90,3	95,9	93,1	85,4	91,9	90,5	91,8	97,7	68,0
0,355	42	98,9	96,8	97,4	92,3	81,4	94,5	94,7	95,6	93,4	92,7	97,7	95,8	91,0	96,1	95,0	95,5	98,9	73,9
0,425	35	99,6	98,1	98,4	95,3	86,1	96,9	96,7	97,7	96,5	94,7	99,0	97,8	95,3	98,6	97,9	97,9	99,6	79,7
0,500	32	99,9	99,0	99,1	97,6	90,5	98,5	98,3	99,1	98,6	96,3	99,7	99,1	98,2	99,7	99,6	99,4	99,9	85,5
0,600	28	100,0	99,6	99,6	99,2	94,3	99,5	99,3	99,8	99,7	97,7	100,0	99,8	99,8	100,0	100,0	99,8	100,0	90,7
0,710	24	100,0	99,8	99,9	99,9	97,2	99,9	99,8	100,0	99,9	98,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	95,1
0,850	20	100,0	100,0	100,0	100,0	99,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,4
1,000	16	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,200	14	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,420	12	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,700	10	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,000	9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tabela 27 - Porcentagem passante acumulada das amostras que compõem o furo N8.

Malha		Amostra																		
(mm)	Série Tyler	N8-0-1,2	N8-1,2-2,4	N8-2,4-3,6	N8-3,6-4,8	N8-4,8-6,0	N8-6,0-7,2	N8-7,2-8,4	N8-8,4-9,6	N8-9,6-10,8	N8-10,8-12,0	N8-12,0-13,2	N8-13,2-14,4	N8-14,4-15,6	N8-15,6-16,8	N8-16,8-18,0	N8-18,0-19,2	N8-19,2-20,4	N8-20,4-21,6	N8-21,6-22,8
0,037	400	35,8	35,9	29,6	33,3	24,6	21,7	37,4	31,2	32,5	27,5	19,7	25,6	28,3	20,2	18,8	37,4	33,6	35,9	45,1
0,045	325	42,0	42,3	34,7	39,2	29,3	30,8	44,2	37,2	38,6	33,8	23,7	31,6	34,2	24,0	22,4	44,1	39,9	42,2	51,7
0,053	270	48,7	49,4	40,4	45,8	34,6	42,5	51,7	44,0	45,7	41,2	28,7	38,9	41,2	28,9	26,9	51,5	47,0	49,3	58,4
0,063	250	54,9	56,0	45,8	52,1	39,9	48,9	58,5	50,6	52,6	48,6	34,4	46,6	48,4	34,3	32,1	58,3	53,7	55,8	63,9
0,074	200	60,7	62,0	50,9	57,8	45,1	55,3	64,6	56,9	59,1	55,8	40,6	54,2	55,4	40,2	37,8	64,4	59,8	61,8	68,4
0,090	170	66,6	68,1	56,6	63,9	51,0	59,8	70,9	63,6	66,2	63,6	48,3	62,8	63,0	47,7	45,0	70,7	66,2	68,1	72,5
0,104	150	72,4	74,0	62,5	69,8	57,2	62,3	76,7	70,1	73,3	71,2	57,0	71,3	70,7	56,3	53,3	76,5	72,2	74,0	76,1
0,125	115	77,6	79,3	68,3	75,3	63,5	64,3	81,9	76,1	79,7	78,1	66,1	79,1	77,7	65,2	62,2	81,6	77,6	79,2	79,1
0,150	100	82,3	84,0	74,0	80,2	69,8	69,2	86,3	81,5	85,5	84,1	75,0	85,8	83,8	74,1	71,1	86,0	82,5	83,9	81,9
0,180	80	86,3	88,0	79,3	84,3	75,7	76,1	89,9	85,9	90,2	89,0	82,9	91,0	88,8	82,0	79,3	89,6	86,6	87,7	84,3
0,212	65	89,6	91,4	84,0	87,7	81,2	80,7	92,7	89,5	93,9	92,8	89,5	94,7	92,6	88,6	86,3	92,5	90,0	90,8	86,6
0,250	60	92,3	94,1	88,2	90,5	86,3	85,8	94,8	92,2	96,6	95,6	94,5	97,1	95,5	93,7	91,9	94,9	92,8	93,4	88,9
0,300	48	94,5	96,2	91,5	92,6	90,6	91,2	96,2	94,3	98,4	97,4	97,9	98,4	97,4	97,1	95,7	96,6	95,0	95,3	90,9
0,355	42	96,2	97,7	94,2	94,2	94,2	94,8	97,3	95,8	99,4	98,6	99,8	99,0	98,7	99,0	98,1	98,0	96,8	96,8	92,9
0,425	35	97,5	98,7	96,1	95,5	96,8	97,1	97,8	96,9	100,0	99,3	100,0	99,2	99,5	99,9	99,3	99,0	98,1	97,9	94,7
0,500	32	98,4	99,3	97,5	96,6	98,6	98,5	98,2	97,8	100,0	99,7	100,0	99,3	99,9	100,0	99,7	99,6	99,0	98,7	96,3
0,600	28	99,0	99,7	98,4	97,6	99,5	99,0	98,7	98,5	100,0	99,9	100,0	99,5	100,0	100,0	99,8	99,9	99,5	99,3	97,7
0,710	24	100,0	99,8	99,1	98,6	99,9	99,8	99,1	99,1	100,0	100,0	100,0	99,7	100,0	100,0	99,9	100,0	99,8	99,7	98,8
0,850	20	100,0	100,0	100,0	99,5	100,0	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	99,9	99,6
1,000	16	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,200	14	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,420	12	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,700	10	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,000	9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Figura 82 - Porcentagem passante acumulada para cada amostra que compõem o furo N8.

Na tabela 28 são apresentados os valores das porcentagens do material passante acumuladas para as amostras que compõem o furo N11 e na figura 83 é apresentado de forma gráfica os resultados obtidos. Os valores do d_{90} variam entre 32 e 115 μm .

Figura 83 - Porcentagem passante acumulada para cada amostra que compõem o furo N11.

Na tabela 29 são apresentados os valores das porcentagens do material passante acumuladas para as amostras que compõem o furo N14 e na figura 84 é apresentado de forma gráfica os resultados obtidos. Os valores do d_{90} variam entre 48 e 80 μm .

Tabela 28 - Porcentagem passante acumulada das amostras que compõem o furo N11.

Malha		Amostra														
(mm)	Série Tyler	N11-0-1,2	N11-1,2-2,4	N11-2,4-3,6	N11-3,6-4,8	N11-4,8-6,0	N11-6,0-7,2	N11-7,2-8,4	N11-8,4-9,6	N11-9,6-10,8	N11-10,8-12,0	N11-12,0-13,2	N11-13,2-14,4	N11-14,4-15,6	N11-15,6-16,8	N11-16,8-18,0
0,037	400	36,2	39,4	42,3	37,3	36,1	36,7	36,4	38,5	37,4	37,1	38,0	36,7	44,1	38,9	36,4
0,045	325	42,7	46,5	50,1	44,0	42,5	43,3	42,9	45,3	44,2	43,7	44,8	43,3	52,2	45,7	42,6
0,053	270	50,0	54,3	58,6	51,4	49,7	50,5	50,1	52,7	51,6	50,8	52,2	50,6	60,9	53,2	49,3
0,063	250	56,9	61,4	66,3	58,2	56,4	57,3	56,8	59,6	58,5	57,5	59,1	57,3	68,8	60,1	55,3
0,074	200	63,3	67,9	73,0	64,5	62,6	63,4	62,8	65,8	64,7	63,6	65,3	63,4	75,6	66,4	60,6
0,090	170	69,9	74,4	79,5	71,0	69,1	69,8	69,2	72,1	71,1	69,8	71,8	69,7	82,2	72,8	65,9
0,104	150	76,3	80,5	85,2	77,1	75,3	75,8	75,2	78,1	77,1	75,8	77,9	75,5	87,8	78,8	70,6
0,125	115	82,0	85,7	89,8	82,6	80,8	81,1	80,6	83,4	82,3	81,2	83,3	80,8	92,2	84,2	74,6
0,150	100	86,9	90,2	93,3	87,3	85,6	85,8	85,5	88,1	86,8	86,0	87,9	85,4	95,4	88,8	77,9
0,180	80	91,0	93,7	95,7	91,2	89,5	89,6	89,5	91,8	90,4	89,9	91,6	89,1	97,6	92,4	80,5
0,212	65	94,2	96,3	97,3	94,3	92,7	92,7	92,8	94,8	93,2	93,1	94,5	92,2	98,9	95,3	82,6
0,250	60	96,5	98,1	98,3	96,7	95,1	95,1	95,4	97,0	95,3	95,5	96,7	94,6	99,7	97,4	84,2
0,300	48	98,1	99,3	99,0	98,3	97,0	96,8	97,4	98,5	96,9	97,3	98,1	96,5	100,0	98,7	85,5
0,355	42	99,1	99,9	99,3	99,4	98,3	98,1	98,7	99,5	98,1	98,5	99,1	97,9	100,0	99,6	87,0
0,425	35	99,6	100,0	99,6	100,0	99,2	98,9	99,5	99,9	99,1	99,2	100,0	98,8	100,0	99,9	88,7
0,500	32	99,9	100,0	99,8	100,0	99,7	99,4	99,9	100,0	99,9	99,6	100,0	99,5	100,0	100,0	90,8
0,600	28	100,0	100,0	99,9	100,0	99,9	99,8	100,0	100,0	100,0	99,9	100,0	99,9	100,0	100,0	93,3
0,710	24	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	95,9
0,850	20	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,5
1,000	16	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,200	14	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,420	12	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,700	10	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,000	9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tabela 29 - Porcentagem passante acumulada das amostras que compõem o furo N14.

Malha		Amostra															
(mm)	Série Tyler	N14-0-1,2	N14-1,2-2,4	N14-2,4-3,6	N14-3,6-4,8	N14-4,8-6,0	N14-6,0-7,2	N14-7,2-8,4	N14-8,4-9,6	N14-9,6-10,8	N14-10,8-12,0	N14-12,0-13,2	N14-13,2-14,4	N14-14,4-15,6	N14-15,6-16,8	N14-16,8-18,0	N14-18,0-19,2
0,037	400	35,8	32,3	37,7	31,9	34,8	31,4	33,3	33,2	34,0	32,3	31,1	31,2	32,0	31,9	34,7	34,7
0,045	325	42,0	38,0	44,1	37,8	41,5	37,1	39,4	39,2	40,1	38,1	36,7	36,9	37,7	38,0	41,0	41,0
0,053	270	48,7	44,4	51,0	44,4	48,8	43,3	46,3	46,2	46,9	44,6	43,1	43,1	44,4	44,9	48,0	48,0
0,063	250	54,9	50,5	57,4	50,6	55,8	49,2	52,8	53,1	53,3	50,8	49,1	49,2	50,8	51,4	54,7	54,7
0,074	200	60,7	56,4	63,2	56,4	62,1	54,8	58,8	59,7	59,1	56,6	54,9	54,9	57,1	57,6	60,8	60,8
0,090	170	66,6	62,7	69,2	62,5	68,7	60,7	65,2	66,9	65,3	62,9	61,1	61,1	64,0	64,2	67,3	67,3
0,104	150	72,4	69,1	74,9	68,6	75,0	66,8	71,5	74,1	71,3	69,2	67,3	67,4	71,0	70,7	73,7	73,7
0,125	115	77,6	75,1	80,1	74,3	80,7	72,7	77,3	80,7	76,8	75,2	73,2	73,4	77,5	76,8	79,5	79,5
0,150	100	82,3	80,8	84,8	79,6	85,7	78,5	82,7	86,5	81,9	80,8	78,8	79,1	83,3	82,3	84,8	84,8
0,180	80	86,3	85,7	88,8	84,2	89,8	83,7	87,3	91,2	86,3	85,8	83,7	84,1	88,3	87,0	89,3	89,3
0,212	65	89,6	90,1	92,0	88,0	93,1	88,4	91,1	94,8	90,1	89,9	87,9	88,4	92,1	90,9	92,9	92,9
0,250	60	92,3	93,8	94,6	91,2	95,7	92,4	94,1	97,4	93,2	93,4	91,4	91,9	95,1	94,0	95,9	95,9
0,300	48	94,5	96,7	96,6	93,6	97,6	95,5	96,4	98,9	95,7	95,9	94,2	94,6	97,2	96,3	97,9	97,9
0,355	42	96,2	98,8	98,1	95,4	98,8	97,8	98,0	99,7	97,6	97,8	96,4	96,6	98,5	97,9	99,3	99,3
0,425	35	97,5	99,9	99,0	96,7	99,5	99,2	99,0	99,9	99,0	99,0	98,0	98,0	99,2	98,9	100,0	100,0
0,500	32	98,4	100,0	99,6	97,7	99,8	99,8	99,6	100,0	100,0	99,5	99,0	99,4	99,6	99,5	100,0	100,0
0,600	28	99,1	100,0	99,9	98,5	100,0	100,0	99,9	100,0	100,0	99,8	99,8	99,7	99,9	99,8	100,0	100,0
0,710	24	100,0	100,0	100,0	99,2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	100,0	99,9	100,0	100,0
0,850	20	100,0	100,0	100,0	99,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,000	16	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,200	14	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,420	12	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,700	10	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,000	9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Figura 84 - Porcentagem passante acumulada para cada amostra que compõem o furo N14.

Na tabela 30 são apresentados os valores das porcentagens do material passante acumuladas para as amostras que compõem o furo N17 e na figura 85 são apresentados de forma gráfica os resultados obtidos. Os valores do d_{90} variam entre 48 e 80 μm .

Figura 85 - Porcentagem passante acumulada para cada amostra que compõem o furo N17.

Na tabela 31 são apresentados os valores das porcentagens do material passante acumuladas para as amostras que compõem o furo N20 e na figura 86 é apresentado de forma gráfica os resultados obtidos. Os valores do d_{90} variam entre 60 e 80 μm .

Tabela 30 - Porcentagem passante acumulada das amostras que compõem o furo N17.

Malha		Amostra																			
(mm)	Série Tyler	N17-0-1,2	N17-1,2-2,4	N17-2,4-3,6	N17-3,6-4,8	N17-4,8-6,0	N17-6,0-7,2	N17-7,2-8,4	N17-8,4-9,6	N17-9,6-10,8	N17-10,8-12,0	N17-12,0-13,2	N17-13,2-14,4	N17-14,4-15,6	N17-15,6-16,8	N17-16,8-18,0	N17-18,0-19,2	N17-19,2-20,4	N17-20,4-21,6	N17-21,6-22,8	N17-22,8-24,0
0,037	400	31,3	36,4	32,4	34,3	26,6	32,5	33,8	31,8	30,8	37,2	35,0	29,7	28,9	29,7	35,4	31,0	32,4	32,9	34,2	34,2
0,045	325	36,9	43,1	38,6	40,6	31,3	38,3	40,4	37,6	36,5	44,2	41,5	35,1	34,3	35,3	41,8	36,6	38,6	39,2	40,7	40,7
0,053	270	43,3	50,6	45,6	47,8	36,6	44,7	47,9	44,2	43,0	52,0	48,7	41,2	40,4	41,7	48,9	43,0	45,6	46,3	48,0	48,0
0,063	250	49,6	57,6	52,4	54,5	41,9	50,8	55,0	50,5	49,2	59,2	55,6	47,1	46,4	47,9	55,6	49,2	52,5	53,1	54,8	54,8
0,074	200	55,6	64,0	58,9	60,8	47,0	56,6	61,6	56,4	55,1	65,7	61,9	52,7	52,1	53,9	61,7	55,1	59,0	59,4	61,2	61,2
0,090	170	62,1	70,5	65,9	67,4	52,8	62,7	68,5	62,7	61,5	72,1	68,3	58,7	58,5	60,5	68,0	61,5	65,9	66,1	67,8	67,8
0,104	150	68,5	76,6	72,7	73,7	58,9	68,8	75,0	68,8	67,8	77,9	74,3	64,8	65,0	67,1	74,1	67,9	72,6	72,5	74,1	74,1
0,125	115	74,5	81,8	78,7	79,3	65,0	75,4	80,7	74,5	73,6	82,7	79,5	70,5	71,3	73,4	79,4	74,0	78,7	78,1	79,6	79,6
0,150	100	80,0	86,2	84,1	84,1	71,1	79,8	85,6	79,5	79,1	86,7	83,9	76,0	77,2	79,1	84,1	79,6	83,9	83,2	84,2	84,2
0,180	80	84,7	89,7	88,4	88,2	77,0	84,5	89,5	83,9	83,9	89,7	87,5	81,0	82,5	84,2	88,0	84,7	88,3	87,3	88,0	88,0
0,212	65	88,5	92,6	91,8	91,5	82,5	88,4	92,7	87,6	88,0	92,0	90,4	85,5	87,2	88,4	91,1	89,1	91,7	90,8	91,1	91,1
0,250	60	91,6	94,9	94,4	94,2	87,5	91,8	95,2	90,7	91,6	93,9	92,8	89,5	91,1	92,0	93,7	92,8	94,4	93,6	93,5	93,5
0,300	48	94,0	96,7	96,3	96,3	91,8	94,4	97,0	93,3	94,5	95,4	94,7	92,8	94,2	94,8	95,6	95,7	96,3	95,8	95,4	95,4
0,355	42	95,9	98,0	97,6	97,9	95,3	96,5	98,4	95,4	96,8	96,7	96,3	95,6	96,7	96,8	97,1	97,9	97,7	97,4	96,8	96,8
0,425	35	97,2	98,9	98,5	99,0	97,8	97,9	99,2	96,9	98,3	97,7	97,5	97,5	98,3	98,3	98,1	99,3	98,5	98,6	97,9	97,9
0,500	32	98,3	99,5	99,1	99,6	99,4	98,8	99,7	98,2	99,3	98,6	98,4	98,9	99,3	99,3	98,8	100,0	99,2	99,4	98,7	98,7
0,600	28	99,0	99,8	99,5	99,9	100,0	99,5	99,9	99,1	99,7	99,2	99,2	99,6	99,8	99,8	99,3	100,0	99,5	99,8	99,3	99,3
0,710	24	99,6	100,0	99,8	100,0	100,0	99,8	100,0	100,0	100,0	100,0	99,6	100,0	100,0	100,0	99,6	100,0	99,7	100,0	99,7	99,7
0,850	20	100,0	100,0	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	100,0	99,9	100,0	99,9	99,9
1,000	16	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,200	14	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,420	12	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,700	10	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,000	9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tabela 31 - Porcentagem passante acumulada das amostras que compõem o furo N20.

Malha		Amostra														
(mm)	Série Tyler	N20-0-1,2	N20-1,2-2,4	N20-2,4-3,6	N20-3,6-4,8	N20-4,8-6,0	N20-6,0-7,2	N20-7,2-8,4	N20-8,4-9,6	N20-9,6-10,8	N20-10,8-12,0	N20-12,0-13,2	N20-13,2-14,4	N20-14,4-15,6	N20-15,6-16,8	N20-16,8-18,0
0,037	400	33,1	37,6	32,4	31,6	31,8	33,2	42,0	36,4	34,7	34,6	35,3	34,4	34,9	32,0	32,0
0,045	325	39,3	43,6	38,6	37,4	37,6	39,3	48,8	43,2	40,8	40,5	41,8	40,5	41,1	38,1	38,1
0,053	270	46,3	50,2	45,7	44,1	44,3	46,2	56,2	50,8	47,6	46,9	49,1	47,2	48,1	45,1	45,1
0,063	250	52,8	56,4	52,5	50,5	50,8	52,8	62,8	57,9	54,1	53,0	56,0	53,3	54,8	51,8	51,8
0,074	200	59,0	62,0	58,9	56,6	57,0	58,9	68,8	64,4	60,2	58,5	62,4	59,0	60,9	58,2	58,2
0,090	170	65,4	67,8	65,5	63,2	63,8	65,4	74,7	71,1	66,5	64,3	69,1	64,8	67,3	64,9	64,9
0,104	150	71,6	73,3	71,9	69,8	70,5	71,5	80,1	77,3	72,7	69,7	75,4	70,4	73,4	71,5	71,5
0,125	115	77,3	78,2	77,6	75,8	76,7	77,0	84,7	82,8	78,2	74,5	81,1	75,4	78,7	77,3	77,3
0,150	100	82,3	82,5	82,6	81,2	82,4	81,8	88,6	87,4	83,1	78,7	86,0	80,0	83,4	82,5	82,5
0,180	80	86,6	86,1	86,8	85,8	87,3	85,8	91,8	91,1	87,3	82,3	89,9	83,9	87,2	86,7	86,7
0,212	65	90,2	89,1	90,2	89,5	91,4	89,1	94,4	94,0	90,7	85,5	93,1	87,2	90,4	90,2	90,2
0,250	60	93,1	91,8	93,0	92,5	94,7	91,9	96,4	96,4	93,6	88,3	95,6	90,1	92,9	93,0	93,0
0,300	48	95,3	94,0	95,2	94,8	97,1	94,1	98,0	98,1	95,7	90,8	97,4	93,0	94,9	95,2	95,2
0,355	42	97,0	96,0	97,0	96,6	98,8	95,8	99,1	99,2	97,4	93,1	98,7	95,0	96,4	96,9	96,9
0,425	35	98,1	97,5	98,2	97,8	99,8	97,2	99,7	100,0	98,5	95,0	99,4	96,0	97,5	98,1	98,1
0,500	32	98,8	98,7	99,1	98,7	100,0	98,3	100,0	100,0	99,2	96,7	99,8	98,0	98,4	99,0	99,0
0,600	28	99,4	99,5	100,0	99,4	100,0	99,1	100,0	100,0	99,6	98,1	100,0	99,0	99,0	99,6	99,6
0,710	24	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,1	100,0	99,5	99,5	99,9	99,9
0,850	20	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	99,8	100,0	100,0
1,000	16	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,200	14	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,420	12	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,700	10	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,000	9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Figura 86 - Porcentagem passante acumulada para cada amostra que compõem o furo N20.

Na tabela 32 são apresentados os valores das porcentagens do material passante acumuladas para as amostras que compõem o furo N23 e na figura 87 são apresentados de forma gráfica os resultados obtidos. Os valores do d_{90} variam entre 35 e 200 μm .

Figura 87 - Porcentagem passante acumulada para cada amostra que compõem o furo N23.

Na tabela 33 são apresentados os valores das porcentagens do material passante acumuladas para as amostras que compõem o furo E3 e na figura 88 é apresentado de forma gráfica os resultados obtidos. Os valores do d_{90} variam entre 60 e 65 μm .

Tabela 32 - Porcentagem passante acumulada das amostras que compõem o furo N23.

Malha		Amostra												
(mm)	Série Tyler	N23-0-1,2	N23-1,2-2,4	N23-2,4-3,6	N23-3,6-4,8	N23-4,8-6,0	N23-6,0-7,2	N23-7,2-8,4	N23-8,4-9,6	N23-9,6-10,8	N23-10,8-12,0	N23-12,0-13,2	N23-13,2-14,4	N23-14,4-15,6
0,037	400	54,8	29,4	30,4	33,5	33,8	33,4	34,0	18,8	18,9	54,2	58,2	39,5	21,7
0,045	325	64,9	34,6	36,1	39,8	39,9	39,6	40,0	23,7	24,4	64,5	68,3	46,2	26,2
0,053	270	74,9	40,5	42,6	46,9	46,8	46,4	46,7	30,5	32,1	74,8	78,2	53,5	31,4
0,063	250	82,8	46,1	48,8	53,8	53,3	52,9	53,1	38,4	41,0	82,9	85,9	60,1	36,5
0,074	200	88,7	51,5	54,7	60,2	59,2	58,9	59,0	47,1	50,4	89,0	91,5	65,8	41,6
0,090	170	93,3	57,3	61,0	67,0	65,3	65,3	65,3	57,4	61,3	93,6	95,7	71,5	47,3
0,104	150	96,2	63,2	67,3	73,5	71,2	71,2	71,3	68,1	72,1	96,6	98,2	76,6	53,1
0,125	115	97,7	68,8	73,0	79,4	76,4	76,6	76,7	77,8	81,5	98,2	99,5	80,7	58,7
0,150	100	98,5	74,1	78,3	84,5	80,9	81,4	81,5	86,1	88,9	98,9	100,0	84,1	64,2
0,180	80	98,7	79,1	82,9	88,7	84,8	85,4	85,5	92,1	94,0	99,2	100,0	86,8	69,3
0,212	65	98,9	83,6	86,7	92,1	88,0	88,7	88,8	96,1	97,0	99,3	100,0	89,0	74,0
0,250	60	99,1	87,8	90,0	94,9	90,7	91,4	91,6	98,4	98,6	99,5	100,0	90,9	78,5
0,300	48	99,3	91,3	92,5	97,0	92,9	93,6	93,8	99,5	99,2	99,7	100,0	92,6	82,6
0,355	42	99,6	94,3	94,5	98,5	94,8	95,3	95,7	99,7	99,3	99,9	100,0	94,2	86,3
0,425	35	99,8	96,6	96,0	99,4	96,4	96,7	97,1	100,0	99,4	100,0	100,0	95,7	89,7
0,500	32	100,0	98,3	97,2	99,9	97,7	97,8	98,3	100,0	99,5	100,0	100,0	97,1	92,8
0,600	28	100,0	99,4	98,1	100,0	98,7	98,6	99,1	100,0	99,6	100,0	100,0	98,3	95,4
0,710	24	100,0	100,0	98,9	100,0	99,4	99,2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,2	97,6
0,850	20	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,8	99,2
1,000	16	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,200	14	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,420	12	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,700	10	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,000	9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tabela 33 - Porcentagem passante acumulada das amostras que compõem o furo E3.

Malha		Amostra						
(mm)	Série Tyler	E3-0-1,2	E3-1,2-2,4	E3-2,4-3,6	E3-3,6-4,8	E3-4,8-6,0	E3-6,0-7,2	E3-7,2-8,4
0,037	400	29,6	32,2	32,8	33,4	32,9	34,1	34,1
0,045	325	35,2	38,3	38,9	39,8	39,3	40,6	40,6
0,053	270	41,5	45,2	45,8	47,1	46,4	47,8	47,8
0,063	250	47,7	51,8	52,4	53,8	53,2	54,6	54,6
0,074	200	53,5	57,9	58,5	60,1	59,5	60,8	60,8
0,090	170	59,8	64,4	65,0	66,6	66,0	67,2	67,2
0,104	150	66,1	70,6	71,3	72,8	72,4	73,3	73,3
0,125	115	71,9	76,3	77,2	78,5	78,1	78,8	78,8
0,150	100	77,4	81,4	82,4	83,5	83,3	83,7	83,7
0,180	80	82,0	85,7	86,9	87,8	87,6	87,8	87,8
0,212	65	85,9	89,2	90,5	91,4	91,2	91,3	91,3
0,250	60	89,0	92,0	93,5	94,2	94,1	94,1	94,1
0,300	48	91,4	94,3	95,7	96,4	96,2	96,3	96,3
0,355	42	93,3	96,0	97,4	98,0	97,8	97,9	97,9
0,425	35	94,7	97,3	98,5	99,0	98,8	99,0	99,0
0,500	32	95,9	98,4	99,2	99,6	99,4	99,7	99,7
0,600	28	97,1	99,1	99,6	100,0	99,8	99,9	99,9
0,710	24	98,2	100,0	99,8	100,0	99,9	100,0	100,0
0,850	20	99,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,000	16	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,200	14	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,420	12	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,700	10	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,000	9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Figura 88 - Porcentagem passante acumulada para cada amostra que compõem o furo E3.

Na tabela 34 são apresentados os valores das porcentagens do material passante acumuladas para as amostras que compõem o furo E5 e na figura 89 são apresentados de forma gráfica os resultados obtidos. Os valores do d_{90} variam entre 35 e 100 μm .

Figura 89 - Porcentagem passante acumulada para cada amostra que compõem o furo E5.

Na tabela 35 são apresentados os valores das porcentagens do material passante acumuladas para as amostras que compõem o furo E7 e na figura 90 são apresentados de forma gráfica os resultados obtidos. Os valores do d_{90} variam entre 60 e 80 μm .

Tabela 34 - Porcentagem passante acumulada das amostras que compõem o furo E5.

Malha		Amostra																				
(mm)	Série Tyler	E5-0-1,2	E5-1,2-2,4	E5-2,4-3,6	E5-3,6-4,8	E5-4,8-6,0	E5-6,0-7,2	E5-7,2-8,4	E5-8,4-9,6	E5-9,6-10,8	E5-10,8-12,0	E5-12,0-13,2	E5-13,2-14,4	E5-14,4-15,6	E5-15,6-16,8	E5-16,8-18,0	E5-18,0-19,2	E5-19,2-20,4	E5-20,4-21,6	E5-21,6-22,8	E5-22,8-24,0	E5-24,0-25,2
0,037	400	23,2	32,5	28,0	25,5	26,7	24,6	19,4	23,3	30,9	25,8	27,0	28,0	36,6	22,1	36,0	28,5	33,3	32,2	42,1	40,4	26,3
0,045	325	27,4	38,6	33,1	30,2	31,7	29,2	24,3	27,5	36,7	30,3	32,1	33,1	42,8	26,1	41,8	33,4	38,9	38,7	49,0	47,3	31,1
0,053	270	32,1	45,3	39,0	35,7	37,4	34,4	29,4	32,3	43,2	35,3	37,8	38,7	49,3	30,6	48,0	38,8	44,9	46,0	56,2	54,8	36,4
0,063	250	36,7	51,7	44,6	40,9	43,0	39,6	33,3	37,0	49,4	40,1	43,2	44,1	55,3	35,1	53,6	43,9	50,5	53,0	62,6	61,5	41,6
0,074	200	41,1	57,6	49,9	46,0	48,3	44,6	36,3	41,6	55,3	44,7	48,4	49,3	60,7	39,5	58,7	48,6	55,6	59,3	68,2	67,5	46,5
0,090	170	46,0	64,0	55,8	51,5	54,3	50,3	39,8	46,8	61,7	49,9	54,1	55,0	66,3	44,6	63,9	53,7	61,0	65,7	73,7	73,5	51,9
0,104	150	51,2	70,2	61,8	57,2	60,4	56,5	43,4	52,4	68,1	55,5	60,0	60,9	71,8	50,2	69,0	58,8	66,4	71,6	78,9	79,0	57,5
0,125	115	56,6	76,0	67,7	62,8	66,6	62,8	47,1	58,2	74,2	61,2	65,8	66,7	76,8	56,1	73,8	64,0	71,5	76,6	83,4	83,9	63,1
0,150	100	62,1	81,3	73,4	68,3	72,7	69,3	52,3	64,1	79,8	67,2	71,6	72,4	81,5	62,3	78,4	69,2	76,4	80,8	87,3	88,2	68,6
0,180	80	67,6	85,9	78,7	73,5	78,4	75,7	59,5	70,1	84,7	73,0	77,1	77,8	85,6	68,7	82,6	74,2	80,9	84,1	90,6	91,7	73,9
0,212	65	72,9	89,8	83,5	78,5	83,8	81,6	68,4	75,8	88,8	78,5	82,1	82,6	89,1	74,9	86,5	79,1	85,0	86,7	93,2	94,5	78,9
0,250	60	78,2	92,9	87,8	83,2	88,6	87,0	78,1	81,2	92,3	83,6	86,7	87,0	92,1	80,9	90,0	83,8	88,6	88,8	95,3	96,7	83,6
0,300	48	83,0	95,3	91,4	87,4	92,6	91,5	86,8	86,1	95,1	88,1	90,6	90,7	94,5	86,2	93,0	88,0	91,7	90,6	96,8	98,1	87,8
0,355	42	87,3	97,0	94,4	91,1	95,7	95,1	93,2	90,3	97,2	91,9	93,8	93,7	96,4	90,9	95,4	91,7	94,2	92,1	97,8	99,6	91,5
0,425	35	91,0	98,1	96,6	94,1	98,0	97,6	96,0	93,6	98,6	94,7	96,2	95,9	97,7	94,5	97,3	94,6	96,2	93,5	98,6	99,9	94,4
0,500	32	94,0	98,8	98,2	96,5	99,3	99,1	97,5	96,1	99,6	96,9	97,9	97,6	98,7	97,1	98,6	96,8	97,6	95,0	99,1	100,0	96,6
0,600	28	96,4	99,3	99,2	98,2	99,9	99,7	98,6	97,9	99,9	98,4	99,0	98,8	99,3	98,7	99,5	98,3	98,6	96,4	99,4	100,0	98,2
0,710	24	98,2	100,0	99,7	99,3	100,0	99,9	99,4	99,1	100,0	99,3	100,0	99,5	99,6	99,5	99,8	99,3	99,2	97,9	99,6	100,0	99,2
0,850	20	99,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	99,9	99,9	100,0	99,8	99,7	99,2	99,9	100,0	98,8
1,000	16	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,200	14	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,420	12	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,700	10	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,000	9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tabela 35 - Porcentagem passante acumulada das amostras que compõem o furo E7.

Malha		Amostra																			
(mm)	Série Tyler	E7-0-1,2	E7-1,2-2,4	E7-2,4-3,6	E7-3,6-4,8	E7-4,8-6,0	E7-6,0-7,2	E7-7,2-8,4	E7-8,4-9,6	E7-9,6-10,8	E7-10,8-12,0	E7-12,0-13,2	E7-13,2-14,4	E7-14,4-15,6	E7-15,6-16,8	E7-16,8-18,0	E7-18,0-19,2	E7-19,2-20,4	E7-20,4-21,6	E7-21,6-22,8	E7-22,8-24,0
0,037	400	36,8	33,7	34,6	32,4	33,7	31,3	30,6	30,3	31,3	31,6	33,3	31,1	32,3	32,4	31,5	31,8	32,1	32,5	26,5	26,5
0,045	325	43,0	40,1	41,4	38,6	40,2	37,0	36,3	36,2	37,3	37,3	39,8	36,9	38,5	38,6	37,5	37,8	38,1	38,6	31,3	31,3
0,053	270	49,9	47,1	48,9	45,6	47,4	43,4	42,8	42,5	44,1	43,7	47,0	43,4	45,5	45,6	44,1	44,4	44,9	45,4	36,8	36,8
0,063	250	56,2	53,6	55,9	52,3	54,2	49,5	49,1	48,9	50,5	49,7	53,8	49,6	52,1	52,2	50,3	50,8	51,2	51,9	42,2	42,2
0,074	200	62,0	59,5	62,3	58,6	60,5	55,2	55,1	54,8	56,4	55,3	60,1	55,5	58,3	58,3	56,1	56,6	63,4	57,9	47,6	47,6
0,090	170	68,0	65,5	68,8	65,4	67,2	61,4	61,5	59,9	62,8	61,3	66,6	61,7	64,7	64,7	62,2	62,8	69,6	64,3	53,8	53,8
0,104	150	74,0	71,1	75,0	72,1	73,5	67,5	67,9	68,1	69,1	67,2	72,8	68,0	71,0	70,9	68,2	68,9	75,3	70,6	60,2	60,2
0,125	115	79,5	76,2	80,5	78,3	79,4	73,2	73,9	73,8	75,0	72,9	78,5	73,9	76,8	76,5	73,7	74,6	80,5	76,5	66,7	66,7
0,150	100	84,6	80,7	85,3	83,9	84,6	78,6	79,6	79,9	80,5	78,2	83,5	79,5	82,2	81,7	78,8	79,8	85,0	82,0	73,1	73,1
0,180	80	88,9	84,6	89,4	88,7	88,9	83,4	84,6	84,4	85,3	83,1	87,6	84,3	86,7	86,0	83,2	84,5	88,8	86,6	79,0	79,0
0,212	65	92,6	87,9	92,7	92,5	92,4	87,5	88,8	93,1	89,5	87,4	91,0	88,5	90,6	89,5	87,0	88,4	92,0	90,4	84,2	84,2
0,250	60	95,5	90,8	95,2	95,5	95,1	91,0	92,5	97,7	93,0	91,1	93,7	91,9	93,6	92,3	90,2	91,7	94,4	93,5	88,7	88,7
0,300	48	97,6	93,1	97,1	97,5	97,0	93,7	95,2	99,1	95,6	94,2	95,7	94,6	95,9	94,3	92,7	94,3	96,2	95,8	92,4	92,4
0,355	42	98,9	95,1	98,4	98,8	98,4	95,8	97,3	99,5	97,6	96,7	97,2	96,7	97,5	95,8	94,8	96,3	97,5	97,4	95,3	95,3
0,425	35	99,6	96,6	99,2	99,5	99,2	97,4	98,7	99,7	99,0	98,4	98,1	98,2	98,5	96,8	96,3	97,6	98,5	98,4	97,3	97,3
0,500	32	99,7	97,8	99,6	99,8	99,6	98,4	99,6	99,8	99,7	99,5	98,8	99,2	99,1	97,6	97,6	98,6	99,1	99,1	98,7	98,7
0,600	28	99,8	98,7	99,8	100,0	99,8	99,1	99,9	99,9	100,0	99,9	99,3	99,7	99,5	98,3	98,5	99,2	99,5	99,5	99,6	99,6
0,710	24	99,9	99,0	99,9	100,0	100,0	99,6	100,0	99,9	100,0	100,0	100,0	99,9	99,7	99,0	99,3	99,6	99,9	99,8	99,9	99,9
0,850	20	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	99,6	100,0	99,9	100,0	99,9	100,0	100,0
1,000	16	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,200	14	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,420	12	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,700	10	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,000	9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Figura 90 - Porcentagem passante acumulada para cada amostra que compõem o furo E7.

Na tabela 36 são apresentados os valores das porcentagens do material passante acumuladas para as amostras que compõem o furo E9 e na figura 91 são apresentados de forma gráfica os resultados obtidos. Os valores do d_{90} variam entre 35 e 80 μm .

Figura 91 - Porcentagem passante acumulada para cada amostra que compõem o furo E9.

Tabela 36 - Porcentagem passante acumulada das amostras que compõem o furo E9.

Malha		Amostra			
(mm)	Série Tyler	E9-0-1,2	E9-1,2-2,4	E9-2,4-3,6	E9-3,6-4,8
0,037	400	30,4	34,0	32,8	33,6
0,045	325	36,1	40,5	39,1	38,8
0,053	270	42,5	47,7	46,2	44,4
0,063	250	48,7	54,5	52,9	49,4
0,074	200	54,5	60,8	59,1	54,0
0,090	170	60,7	67,4	65,7	58,8
0,104	150	66,8	73,7	72,1	63,5
0,125	115	72,6	79,4	78,0	68,0
0,150	100	77,9	84,5	83,3	72,4
0,180	80	82,5	88,8	87,9	76,4
0,212	65	86,5	92,3	91,7	80,0
0,250	60	90,0	95,0	94,8	83,3
0,300	48	92,7	97,0	97,0	86,1
0,355	42	95,0	98,3	98,5	88,7
0,425	35	96,7	99,2	99,5	91,0
0,500	32	98,0	99,6	99,9	93,1
0,600	28	98,9	99,9	100,0	95,2
0,710	24	99,5	100,0	100,0	97,2
0,850	20	99,9	100,0	100,0	99,0
1,000	16	100,0	100,0	100,0	100,0
1,200	14	100,0	100,0	100,0	100,0
1,420	12	100,0	100,0	100,0	100,0
1,700	10	100,0	100,0	100,0	100,0
2,000	9	100,0	100,0	100,0	100,0

5.2 Caracterização da amostra blendada

Após a caracterização química e granulométrica das amostras coletadas na barragem de rejeitos, foram separadas 50% da massa seca de cada uma. Estas alíquotas foram juntadas em apenas uma amostra composta, totalizando uma massa de aproximadamente 145 kg. Esta amostra foi homogeneizada e posteriormente quarteada em quarteador Jones.

5.2.1 Composição química

A alíquota gerada foi caracterizada determinando-se a composição química apresentada na tabela 37.

Tabela 37 - Composição química do rejeito do processo Caron – amostra blendada.

Elemento / óxido	Teor (%)
Fe	30,86
Ni	0,51
Cu	0,11
Co	0,054
Cr	1,43
Mn	0,74
SiO ₂	29,76
Al ₂ O ₃	6,53
MgO	5,66
CaO	0,55

A amostra é essencialmente constituída por ferro (30,86%) e SiO₂ (29,76%), além de Al₂O₃ (6,53%), MgO (5,66%) e Cr (1,43%); os teores de Ni, Cu, Co e Mn são, respectivamente de 0,51%, 0,11%, 0,054% e 0,74%.

5.2.2 Composição mineralógica

A composição mineralógica da amostra do rejeito do processo Caron está apresentada na tabela 38.

Tabela 38 - Composição mineralógica do rejeito do processo Caron.

Fração (mm)	% em massa		Minerais (%)						
	retida	acumulada	Quartzo	Cromita	Olivina	Piroxênio-Anfibólio	Óxido de Fe	Willemseita	Óxido de Mn
-0,297	1,5	1,5	17	3	14	33	28	2	3
-0,297+0,074	24,7	26,2	10	7	22	29	28	2	3
-0,074+0,044	12,8	39,0	10	9	14	27	37	2	2
-0,044+0,037	7,7	46,7	11	9	14	23	40	2	2
-0,037+0,020	13,3	60,0	12	7	8	21	48	2	2
-0,020 desl.	28,2	88,2	15	5	9	4	63	2	2
lama	11,8	100,0	15	3	9	5	66	1	1
TOTAL	100		12	6	13	17	47	2	2

O rejeito Caron é constituído por óxidos de ferro ($\cong 47\%$ em massa), quartzo (cerca de 12% em massa), olivina (13% em massa), piroxênio-anfibólio (17%), cromita (6%), willemseita (2% - $(\text{Ni,Mg})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) e óxido de Mn ($\cong 2\%$).

Na figura 92 é apresentado o difratograma obtido representando a identificação mineralógica da amostra blendada.

Figura 92 - Difratograma obtido da amostra blendada.

5.2.3 Microscopia eletrônica de varredura

A composição química média das principais fases identificadas obtidas nas análises efetuadas no MEV, é apresentada na tabela 39.

Tabela 39 - Composição química das principais fases identificadas.

Fase	Teores (%)									
	Mg	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Co
Cromita	6,1	16,7			21,5		20,6			
Óxidos de Fe	2,0	7,2	12,0				60,6	1,9		
Silicato de Ca e Mg	15,1		50,2	24,2			2,3			
Silicato de Fe	4,1	13,3	25,9				44,4	1,1		
Silicato de Ni	3,7		44,9				3,3	31,6	3,3	
Silicato de Fe e Mg	18,3	6,3	58,8				14,8	3,2		
Óxidos de Mn	2,0	12,1	6,5			29,5	12,4	2,1	1,5	2,7

Fonte: KAHN (2007).

Na figura 93 é apresentada a micrografia obtida no MEV assim como a identificação dos espectros analisados. Na tabela 40 é apresentada a composição química obtida por EDS para cada espectro.

Figura 93 - Micrografia do rejeito Caron. Aspecto geral do produto.

Fonte: KAHN (2007).

Tabela 40 - Composição química dos espectros apresentados na figura 89.

Espectro	Teores (%)									
	Fe	Ni	Co	Cr	Si	Al	Mg	Ca	Ti	S
1	19,4	1,32	0,0	0,00	27,4	1,65	5,73	0,00	0,00	0,00
2	22,1	2,21	0,0	0,00	26,3	3,26	2,79	0,30	0,00	0,00
3	17,1	0,96	0,0	1,62	27,3	3,71	4,08	0,31	0,00	0,00
4	14,8	1,10	0,0	1,14	25,7	9,63	1,97	0,00	0,00	0,00
5	20,5	0,65	0,0	0,00	27,7	2,19	5,13	0,29	0,00	0,00
6	19,5	0,61	0,0	0,00	27,6	2,33	8,65	0,31	0,00	0,31
7	10,1	3,75	0,0	0,84	29,7	4,22	7,03	0,46	0,00	0,00
8	22,5	0,62	0,0	1,56	24,2	6,89	2,42	0,37	0,00	0,00
9	10,7	3,76	0,0	1,62	25,0	9,68	1,21	0,30	0,37	0,20
10	20,4	0,75	0,0	2,44	25,0	6,02	2,41	0,34	0,00	0,00
11	15,0	3,26	0,0	0,97	25,3	6,05	5,49	0,42	0,00	0,34

Fonte: KAHN (2007).

Na figura 90 é apresentada a micrografia do rejeito Caron apresentando a variação dos teores de níquel associados aos silicatos. Observam-se teores de níquel mais altos no centro (1 e 2), da ordem de 20 a 21%, diminuindo para as bordas (4 e 6), com teores de níquel em torno de 3%. Na tabela 41 é apresentada a composição química obtida por EDS para cada espectro da figura 94.

Figura 94 - Micrografia do rejeito Caron.

Fonte: KAHN (2007).

Tabela 41 - Composição química dos espectros apresentados na figura 90.

Espectro	Teores (%)								
	Fe	Ni	Cu	Mn	Si	Al	Mg	Ca	S
1	9,5	21,40	1,2	1,09	18,8	3,06	5,21	0,00	0,48
2	11,6	19,60	1,1	0,94	19,1	2,39	5,23	0,00	0,42
3	11,6	7,30	0,9	0,75	26,2	2,72	7,04	0,00	0,30
4	12,5	3,01	0,9	0,35	29,9	2,34	6,62	0,00	0,24
5	11,0	6,98	1,2	0,82	26,8	2,84	7,37	0,36	0,24
6	12,5	3,44	0,6	0,41	30,6	2,36	6,82	0,26	0,24
7	9,9	4,98	1,5	0,82	32,0	3,94	8,24	0,38	0,68
8	11,0	3,51	0,7	0,00	31,0	2,73	7,89	0,30	0,27
9	11,2	10,40	1,2	0,72	25,4	2,70	6,45	0,00	0,33

Fonte: KAHN (2007).

5.3 Lixiviação

Os resultados dos ensaios da lixiviação estão apresentados na tabela 42. Nesta tabela são demonstrados os teores de Ni, Co, Fe e Mg na solução obtida na lixiviação, assim como os resultados das extrações de cada metal em cada ensaio.

Os cálculos das extrações dos metais de interesse são realizados de acordo com a seguinte fórmula:

$$\eta\% = \frac{m_{ME\ SOL}}{m_{ME\ INI}} \cdot 100$$

onde:

$\eta\%$ - porcentagem de extração;

$m_{ME\ SOL}$ – massa do metal de interesse na solução gerada na lixiviação após a filtração (g);

$m_{ME\ INI}$ – massa do metal de interesse contido na amostra inicial (g)

Tabela 42 - Resultados dos ensaios de lixiviação e cálculo das extrações dos metais de interesse.

Ensaio	Teores (ppm)				Extração (%)			
	Ni	Co	Fe	Mg	Ni	Co	Fe	Mg
1	120,95	28,67	1379,50	427,30	23,72%	53,09%	4,47%	12,57%
2	128,36	29,18	1394,77	478,10	25,17%	54,04%	4,52%	14,06%
3	124,63	27,34	1288,85	471,80	24,44%	50,63%	4,18%	13,88%
4	134,97	28,59	1275,12	502,40	26,46%	52,94%	4,13%	14,78%
5	157,40	31,73	1356,01	634,40	30,86%	58,76%	4,39%	18,66%
6	149,14	30,01	1273,99	600,80	29,24%	55,57%	4,13%	17,67%
7	158,21	31,76	1331,23	641,90	31,02%	58,81%	4,31%	18,88%
8	192,89	36,47	5439,89	906,00	37,82%	67,54%	17,63%	26,65%
9	210,77	36,09	6165,66	1093,00	41,33%	66,83%	19,98%	32,15%
10	226,86	36,40	6672,08	1122,80	44,48%	67,41%	21,62%	33,02%
11	232,83	37,98	6680,81	1117,00	45,65%	70,33%	21,65%	32,85%
12	242,44	38,86	6866,58	1154,90	47,54%	71,96%	22,25%	33,97%
13	238,72	37,64	6717,25	1151,70	46,81%	69,70%	21,77%	33,87%
14	234,28	37,77	6390,65	1128,50	45,94%	69,94%	20,71%	33,19%
15	237,50	38,52	9972,82	1097,00	46,57%	71,33%	32,32%	32,26%
16	254,32	39,16	12417,61	1191,90	49,87%	72,52%	40,24%	35,06%
17	257,62	39,04	12916,20	1176,80	50,51%	72,30%	41,85%	34,61%
18	263,76	39,27	14183,24	1250,50	51,72%	72,72%	45,96%	36,78%
19	291,88	38,79	15485,92	1339,80	57,23%	71,83%	50,18%	39,41%
20	278,37	40,15	14661,40	1271,70	54,58%	74,35%	47,51%	37,40%
21	279,63	39,88	14884,35	1299,20	54,83%	73,85%	48,23%	38,21%
22	234,55	35,10	14461,20	1066,00	45,99%	65,00%	46,86%	31,35%
23	241,81	35,27	16756,33	1109,10	47,41%	65,31%	54,30%	32,62%
24	264,72	38,72	18992,74	1178,30	51,91%	71,70%	61,54%	34,66%
25	267,16	38,30	20581,55	1213,90	52,38%	70,93%	66,69%	35,70%
26	271,47	38,55	20630,89	1203,40	53,23%	71,39%	66,85%	35,39%
27	298,61	39,76	22439,39	1316,60	58,55%	73,63%	72,71%	38,72%
28	321,50	42,70	24006,18	1431,10	63,04%	79,07%	77,79%	42,09%
29	148,86	33,22	1715,56	523,60	29,19%	61,52%	5,56%	15,40%
30	164,37	32,67	1765,76	582,80	32,23%	60,50%	5,72%	17,14%
31	172,78	34,08	1768,19	626,60	33,88%	63,11%	5,73%	18,43%
32	175,75	35,21	1615,79	627,50	34,46%	65,20%	5,24%	18,46%
33	211,25	36,06	1602,48	777,60	41,42%	66,78%	5,19%	22,87%
34	221,64	35,81	1531,73	814,20	43,46%	66,31%	4,96%	23,95%
35	238,10	35,68	1436,35	897,90	46,69%	66,07%	4,65%	26,41%
36	127,81	26,36	1398,06	453,40	25,06%	48,81%	4,53%	13,34%
37	170,32	34,64	1724,35	588,90	33,40%	64,15%	5,59%	17,32%
38	190,42	35,08	1774,11	642,00	37,34%	64,96%	5,75%	18,88%
39	200,77	36,65	1723,34	695,80	39,37%	67,87%	5,58%	20,46%
40	227,94	37,42	1442,42	837,50	44,69%	69,30%	4,67%	24,63%
41	264,77	38,20	1379,24	982,90	51,92%	70,74%	4,47%	28,91%
42	290,00	37,14	823,36	1100,00	56,86%	68,78%	2,67%	32,35%
43	160,82	35,07	1519,64	519,90	31,53%	64,94%	4,92%	15,29%
44	173,79	34,94	1538,50	416,97	34,08%	64,70%	4,99%	12,26%
45	188,23	36,97	1616,27	414,86	36,91%	68,46%	5,24%	12,20%
46	199,68	41,05	1526,43	428,48	39,15%	76,02%	4,95%	12,60%
47	237,53	37,84	839,27	438,11	46,57%	70,07%	2,72%	12,89%
48	258,01	40,01	676,83	456,17	50,59%	74,09%	2,19%	13,42%
49	299,32	44,71	491,05	501,44	58,69%	82,80%	1,59%	14,75%
50	162,08	35,30	1257,34	430,20	31,78%	65,37%	4,07%	12,65%
51	175,72	35,56	1519,04	524,50	34,45%	65,85%	4,92%	15,43%
52	190,34	37,00	1441,10	551,50	37,32%	68,52%	4,67%	16,22%
53	212,58	39,00	1221,98	619,50	41,68%	72,22%	3,96%	18,22%
54	264,35	39,44	435,44	1001,40	51,83%	73,04%	1,41%	29,45%
55	290,63	43,59	322,83	1106,20	56,99%	80,72%	1,05%	32,54%
56	337,79	49,18	255,04	1268,80	66,23%	91,07%	0,83%	37,32%

Para determinar as melhores condições de lixiviação em relação à extração de níquel e cobalto e a seletividade para com o ferro e magnésio, foram avaliados os parâmetros de processo independentemente, ou seja, foram avaliados os efeitos do tempo de residência, temperatura, concentração de ácido sulfúrico na extração do níquel, cobalto, ferro e magnésio.

Na figura 95 é apresentada a aparelhagem utilizada nos ensaios de lixiviação. Devido à grande quantidade de ensaios de lixiviação definidos no planejamento, conforme a tabela 17, foram realizados quatro ensaios simultaneamente.

Figura 95 – Aparato utilizado nos ensaios de lixiviação.

5.3.1 Efeito do tempo de residência na extração dos metais

Nos gráficos apresentados nas figuras 96, 97, 98 e 99, foi verificado o efeito do tempo de residência na extração do níquel, cobalto, ferro e magnésio respectivamente.

Figura 96 - Efeito do tempo de residência em relação à extração de níquel.

Figura 97 - Efeito do tempo de residência em relação à extração de cobalto.

Figura 98 - Efeito do tempo de residência em relação à extração de ferro.

Figura 99 - Efeito do tempo de residência em relação à extração de magnésio.

Verifica-se que com o aumento do tempo de residência há maior extração de níquel, cobalto e magnésio, enquanto o ferro não apresenta mudanças significativas. Como nestes gráficos foram avaliados um conjunto de dados para determinar o efeito do tempo de residência, foi calculado a mediana de cada conjunto de dados a fim de determinar de uma forma mais clara o efeito deste parâmetro de processo. Na tabela 43, são apresentados os dados da mediana obtidos para cada tempo de residência em relação a cada metal de interesse. Na figura 96 verifica-se o efeito do tempo de residência em relação à mediana dos valores da extração dos metais.

Tabela 43 - Medianas dos valores da extração em relação ao tempo de residência da lixiviação.

Metal	Tempo de Residência						
	1 hora	2 horas	4 horas	8 horas	24 horas	32 horas	48 horas
Ni	31,66%	34,27%	37,33%	40,53%	47,06%	51,26%	55,85%
Co	64,97%	65,01%	67,94%	70,63%	70,73%	72,19%	71,90%
Fe	5,24%	5,65%	5,74%	5,41%	4,93%	4,72%	4,48%
Mg	15,35%	17,23%	18,66%	19,46%	27,04%	30,72%	32,77%

Figura 100 - Representação gráfica das medianas dos valores de extração de cada metal em comparação com o tempo de residência.

Na figura 100 verifica-se que com o aumento do tempo de residência há um aumento significativo das extrações de níquel e magnésio, enquanto o aumento da extração de cobalto é de menor intensidade. Em relação ao ferro, a extração manteve-se praticamente estável com o aumento do tempo de residência.

5.3.2 Efeito da temperatura na extração dos metais

Nos gráficos apresentados nas figuras 101, 102, 103 e 104, foi verificado o efeito da temperatura na extração do níquel, cobalto, ferro e magnésio respectivamente.

Figura 101 - Efeito da temperatura em relação à extração de níquel.

Figura 102 - Efeito da temperatura em relação à extração de cobalto.

Figura 103 - Efeito da temperatura em relação à extração de ferro.

Figura 104 - Efeito da temperatura em relação à extração de magnésio.

Verifica-se que com o aumento da temperatura diminui a extração de níquel, cobalto ferro e magnésio, mas mais significativamente para o ferro e magnésio. Como nestes gráficos foram avaliados um conjunto de dados para determinar o efeito da temperatura, foi novamente calculada a mediana de cada conjunto de dados a fim de determinar de uma forma mais clara o efeito deste parâmetro de processo. Na tabela 44, são apresentados os dados da mediana obtidos para cada temperatura em relação a cada metal de interesse. Na figura 105 verifica-se o efeito temperatura em relação à mediana dos valores da extração dos metais.

Tabela 44 - Medianas dos valores da extração em relação a temperatura da lixiviação.

Elemento	Temperatura	
	50°C	80°C
Ni	46,69%	39,26%
Co	70,14%	67,32%
Fe	27,28%	4,80%
Mg	33,11%	17,77%

Figura 105 - Representação gráfica das medianas dos valores de extração de cada metal em comparação com a temperatura da lixiviação.

Na figura 105 verifica-se que com o aumento da temperatura há redução das extrações de todos os metais, mais significativamente para ferro e magnésio. A redução da extração do níquel com o aumento da temperatura foi de 16%, do cobalto 4%, do ferro 82% e do magnésio 46%.

5.3.3 Efeito da concentração de ácido sulfúrico na extração dos metais

Nos gráficos apresentados nas figuras 106, 107, 108 e 109, foi verificado o efeito da concentração de ácido sulfúrico na extração do níquel, cobalto, ferro e magnésio respectivamente.

Figura 106 - Efeito da concentração de ácido sulfúrico em relação à extração de níquel.

Figura 107 - Efeito da concentração de ácido sulfúrico em relação à extração de cobalto.

Figura 108 - Efeito da concentração de ácido sulfúrico em relação à extração de ferro.

Figura 109 - Efeito da concentração de ácido sulfúrico em relação à extração de magnésio.

Verifica-se que, com o aumento da concentração de ácido sulfúrico, há maior extração de níquel, cobalto e ferro, mais significativamente para o níquel e ferro. Para o magnésio houve um aumento de sua extração, mas verificou-se uma queda quando se aplicou uma concentração de ácido sulfúrico de 50 g/L. Como nestes gráficos foram avaliados um conjunto de dados para determinar o efeito da concentração de ácido sulfúrico, foi calculado a mediana de cada conjunto de dados a fim de determinar de uma forma mais clara o efeito deste parâmetro de processo. Na tabela 45, são apresentados os dados da mediana obtidos para cada concentração de ácido

sulfúrico em relação a cada metal de interesse. Na figura 106 verifica-se o efeito concentração do ácido sulfúrico em relação à mediana dos valores da extração dos metais.

Tabela 45 - Medianas dos valores da extração em relação a concentração de ácido sulfúrico.

Elemento	Concentração de Ácido Sulfúrico			
	10 g/L	25 g/L	50 g/L	100 g/L
Ni	30,94%	44,59%	50,19%	51,87%
Co	59,66%	68,32%	72,41%	71,55%
Fe	4,59%	11,69%	18,78%	25,89%
Mg	18,05%	30,53%	23,78%	32,58%

Figura 110 - Representação gráfica das medianas dos valores de extração de cada metal em comparação com a concentração de ácido sulfúrico.

Na figura 110 verifica-se que com o aumento da concentração de ácido sulfúrico há o aumento das extrações de níquel, cobalto e ferro, mais significativamente para níquel e ferro. Para o magnésio há uma tendência de elevação da extração em relação à concentração de ácido sulfúrico, mas percebemos uma queda na extração quando se aplicou a concentração de 50 g/L.

5.3.4 Seletividade

Para determinar a maior seletividade de extração do níquel e cobalto em relação à extração do ferro e magnésio utilizaram-se os valores das medianas das extrações do níquel e cobalto em relação aos valores das medianas das extrações de ferro e magnésio para cada parâmetro avaliado, ou seja, para tempo de residência, temperatura e concentração de ácido. Nas tabelas 46, 47 e 48 são apresentados os valores da seletividade para cada parâmetro de processo avaliado em relação à extração de níquel e nas figuras 111, 112 e 113 os gráficos da evolução da seletividade. As fórmulas para o cálculo da seletividade Ni:Fe, Ni:Mg, Co:Fe e Co:Mg são:

$$Se_{Ni:Fe} = \frac{Md_{Ni}}{Md_{Fe}}$$

onde:

$Se_{Ni:Fe}$ = seletividade das extrações do níquel em relação às extrações do ferro;

Md_{Ni} = mediana dos valores das extrações de níquel;

Md_{Fe} = mediana dos valores das extrações de ferro;

$$Se_{Ni:Mg} = \frac{Md_{Ni}}{Md_{Mg}}$$

onde:

$Se_{Ni:Mg}$ = seletividade das extrações do níquel em relação às extrações do magnésio;

Md_{Ni} = mediana dos valores das extrações de níquel;

Md_{Mg} = mediana dos valores das extrações de magnésio;

$$Se_{Co:Fe} = \frac{Md_{Co}}{Md_{Fe}}$$

Onde:

$Se_{Co:Fe}$ = seletividade das extrações de cobalto em relação às extrações do ferro;

Md_{Co} = mediana dos valores das extrações de cobalto;

Md_{Fe} = mediana dos valores das extrações de ferro;

$$Se_{Co:Mg} = \frac{Md_{Co}}{Md_{Mg}}$$

onde:

$Se_{Co:Mg}$ = seletividade das extrações de cobalto em relação às extrações de magnésio;

Md_{Co} = mediana dos valores das extrações de cobalto;

Md_{Mg} = mediana dos valores das extrações de magnésio;

Tabela 46 - Seletividade Ni:Fe e Ni:Mg em relação ao tempo de residência.

Mediana das Extrações	Tempo de Residência						
	1h	2h	4h	8h	24h	32h	48h
Ni	31,66%	34,27%	37,33%	40,53%	47,06%	51,26%	55,85%
Fe	5,24%	5,65%	5,74%	5,41%	4,93%	4,72%	4,48%
Mg	15,35%	17,23%	18,66%	19,46%	27,04%	30,72%	32,77%
Seletividade Ni:Fe	6,04	6,06	6,50	7,49	9,54	10,87	12,45
Seletividade Ni:Mg	2,06	1,99	2,00	2,08	1,74	1,67	1,70

Figura 111 - Gráfico da seletividade Ni:Fe e Ni:Mg em relação ao tempo de residência.

Tabela 47 - Seletividade Ni:Fe e Ni:Mg em relação a temperatura.

Mediana das Extrações	Temperatura	
	50°C	80°C
Ni	46,69%	39,26%
Fe	27,28%	4,80%
Mg	33,11%	17,77%
Seletividade Ni:Fe	1,71	8,18
Seletividade Ni:Mg	1,41	2,21

Figura 112 - Gráfico da seletividade Ni:Fe e Ni:Mg em relação a temperatura.

Tabela 48 - Seletividade Ni:Fe e Ni:Mg em relação a concentração de ácido sulfúrico.

Mediana das Extrações	Concentração de Ácido Sulfúrico			
	10 g/L	25 g/L	50 g/L	100 g/L
Ni	30,94%	44,59%	50,19%	51,87%
Fe	4,59%	11,69%	18,78%	25,89%
Mg	18,05%	30,53%	23,78%	32,58%
Seletividade Ni:Fe	6,75	3,81	2,67	2,00
Seletividade Ni:Mg	1,71	1,46	2,11	1,59

Figura 113 - Gráfico da seletividade Ni:Fe e Ni:Mg em relação a concentração de ácido sulfúrico.

Nas tabelas 49, 50 e 51 são apresentados os valores da seletividade para cada parâmetro de processo avaliado em relação à extração de cobalto e nas figuras 114, 115 e 116 os gráficos da evolução da seletividade.

Tabela 49 - Seletividade Co:Fe e Co:Mg em relação ao tempo de residência.

Mediana das Extrações	Tempo de Residência						
	1h	2h	4h	8h	24h	32h	48h
Co	64,97%	65,01%	67,94%	70,63%	70,73%	72,19%	71,90%
Fe	5,24%	5,65%	5,74%	5,41%	4,93%	4,72%	4,48%
Mg	15,35%	17,23%	18,66%	19,46%	27,04%	30,72%	32,77%
Seletividade Co:Fe	12,40	11,50	11,84	13,06	14,34	15,31	16,03
Seletividade Co:Mg	4,23	3,77	3,64	3,63	2,62	2,35	2,19

Figura 114 - Gráfico da seletividade Co:Fe e Co:Mg em relação ao tempo de residência.

Tabela 50 - Seletividade Co:Fe e Co:Mg em relação a temperatura.

Mediana das Extrações	Temperatura	
	50°C	80°C
Co	70,14%	67,32%
Fe	27,28%	4,80%
Mg	33,11%	17,77%
Seletividade Co:Fe	2,57	14,03
Seletividade Co:Mg	2,12	3,79

Figura 115 - Gráfico da seletividade Co:Fe e Co:Mg em relação a temperatura.

Tabela 51 - Seletividade Co:Fe e Co:Mg em relação a concentração de ácido sulfúrico.

Mediana das Extrações	Concentração de Ácido Sulfúrico			
	10 g/L	25 g/L	50 g/L	100 g/L
Co	59,66%	68,32%	72,41%	71,55%
Fe	4,59%	11,69%	18,78%	25,89%
Mg	18,05%	30,53%	23,78%	32,58%
Seletividade Co:Fe	13,01	5,85	3,86	2,76
Seletividade Co:Mg	3,31	2,24	3,05	2,20

Figura 116 - Gráfico da seletividade Co:Fe e Co:Mg em relação a concentração de ácido sulfúrico.

Para definir as melhores condições de extração do níquel e cobalto com seletividade à extração de ferro e magnésio foram comparados os gráficos apresentados nas figuras 100, 105, 110, 111, 112, 113, 114, 115 e 116. Com estas informações definiram-se os melhores parâmetros de processo para a lixiviação, que são apresentados na tabela 52.

Tabela 52 - Melhores parâmetros de processo da lixiviação.

Elemento	Tempo de Residência	Temperatura	Concentração de Ácido Sulfúrico
Ni	48h	80 °C	50 g/L
Co	48h	80 °C	50 g/L

Tanto para o níquel quanto para o cobalto os melhores parâmetros de processo para a etapa de lixiviação são os mesmos, ou seja, tempo de residência de 48 horas, temperatura de 80°C e concentração de ácido sulfúrico de 50 g/L. Apesar das figuras 113 e 116 apresentarem que a concentração de 10 g/L de ácido sulfúrico apresenta as melhores condições de seletividade do ferro para com o níquel e cobalto, nesta concentração houve as piores taxas de extração para estes dois metais, conforme a figura 110. Então foi estabelecida a concentração de 50 g/L, pois apresenta bons níveis de extração e de seletividade razoavelmente boas.

Com estas definições, estes parâmetros foram replicados com o intuito de gerar amostras maiores para que os ensaios subsequentes de neutralização e separação pudessem ser realizados. A nova amostra gerada apresentou um volume de 10 L.

5.4 Neutralização

Com a solução resultante (10 L), foi separada uma alíquota de 4 L para a realização dos ensaios de neutralização, enquanto os 6 L restantes foram armazenados para a realização dos ensaios de extração e eluição.

Na tabela 53 são apresentados os resultados da elevação do pH de acordo com a adição da massa de calcário e o tempo de residência. Em todos os ensaios foi mantida a temperatura em 80 °C. Na figura 117, é apresentada a representação gráfica dos resultados dos ensaios de neutralização.

Tabela 53 - Resultados dos ensaios de neutralização.

Tempo de Residência	pH	m calcário adicionada (g)
0 h	2,36	0
1 h	2,78	90
2 h	3,45	180
3 h	3,89	270
4 h	4,05	360

Figura 117 - Resultados dos ensaios de neutralização.

Na figura 118 são apresentadas as fotos dos ensaios de neutralização. Visualmente, percebe-se um aumento significativo da viscosidade devido ao aumento do teor de sólidos na solução. As figuras 118 a, 118 c, 118 e e 118 g, representam os processos de neutralização adicionando-se 90, 180, 270 e 360 g de calcário, respectivamente. As figuras 118 b, 118 d, 118 f e 118 h apresentaram borbulhamento logo após a adição de calcário e consequente formação de CO_2 . Percebeu-se maior intensidade de borbulhamento de acordo com a maior quantidade de calcário adicionado à solução.

Figura 118 - Ensaios de neutralização.

A formação de CO_2 ocorre devido ao ácido sulfúrico livre contido na solução em contato com o calcário adicionado, de acordo com a reação apresentada a reação 22.

(22)

Avaliando-se os resultados dos ensaios de neutralização verificou-se que o tempo de residência de 4h e adição de calcário de 360 g seriam os parâmetros que deveriam ser aplicados, pois atingiu-se o pH de 4,05, mas se avaliarmos o resultado dos ensaios de tempo de residência de 3 h e adição de calcário de 270 g verifica-se o atingimento de um pH de 3,89. Este resultado implica em um consumo 25% menor de calcário para uma elevação de apenas 4% do pH, então optou-se como o melhor resultado dos ensaios de neutralização, o tempo de residência de 3 h e adição de calcário de 270 g. Na solução gerada nestas condições, foi analisado o teor de sólidos e o resultado verificado foi de 35%.

5.5 Troca iônica em polpa

Com a solução resultante (6 L), foi separada uma alíquota de 4 L para a realização dos ensaios de troca iônica em polpa ou extração ou “*Resin in Pulp*”, enquanto os 2 L restantes foram armazenados para a realização dos ensaios de eluição.

Os resultados das concentrações de níquel, cobalto, ferro e magnésio, resultantes do processo de extração, e as percentagens de extração são apresentados nas tabelas 54, 55, 56 e 57, respectivamente. A representação gráfica dos resultados da extração para o níquel, cobalto, ferro e magnésio são apresentadas nas figuras 119, 120, 121 e 122 respectivamente.

Tabela 54 - Teores de níquel na solução resultantes da etapa de extração e a eficiência do processo

		Teores na solução (ppm)			Eficiência de extração (%)		
Tempo de Residência		1 h	2 h	4 h	1 h	2 h	4 h
Volume de Resina (%)	2%	214,8	139,8	122,4	28,24%	53,29%	59,11%
	3%	184,5	164,8	158,3	38,36%	44,94%	47,11%
	5%	264,8	238,7	224,9	11,53%	20,25%	24,86%

Tabela 55 - Teores de cobalto na solução resultantes da etapa de extração e a eficiência do processo

		Teores na solução (ppm)			Eficiência de extração (%)		
Tempo de Residência		1 h	2 h	4 h	1 h	2 h	4 h
Volume de Resina (%)	2%	30,7	18,4	14,7	31,34%	58,85%	67,12%
	3%	27,5	22,8	18,6	38,49%	49,00%	58,40%
	5%	39,8	36,3	30,4	10,98%	18,81%	32,01%

Tabela 56 - Teores de ferro na solução resultantes da etapa de extração e a eficiência do processo

		Teores na solução (ppm)			Eficiência de extração (%)		
Tempo de Residência		1 h	2 h	4 h	1 h	2 h	4 h
Volume de Resina (%)	2%	434,8	405,9	384,7	13,29%	19,05%	23,28%
	3%	394,9	332,1	309,2	21,25%	33,77%	38,34%
	5%	294,6	219,7	198,9	41,25%	56,19%	60,33%

Tabela 57 - Teores de magnésio na solução resultantes da etapa de extração e a eficiência do processo

		Teores na solução (ppm)			Eficiência de extração (%)		
Tempo de Residência		1 h	2 h	4 h	1 h	2 h	4 h
Volume de Resina (%)	2%	462,8	421,5	384,4	5,75%	14,16%	21,72%
	3%	392,3	322,8	307,4	20,11%	34,26%	37,40%
	5%	287,6	201,8	197,3	41,43%	58,90%	59,82%

Figura 119 - Representação gráfica das eficiências de extração de níquel.

Figura 120 - Representação gráfica das eficiências de extração de cobalto.

Figura 121 - Representação gráfica das eficiências de extração de ferro.

Figura 122 - Representação gráfica das eficiências de extração de magnésio.

Na figura 123 é demonstrada a resina TP220 carregada de níquel, cobalto, ferro e magnésio após o processo de extração. Verifica-se a coloração verde, indicando a adsorção dos metais, principalmente níquel.

Figura 123 - Resinas TP220 carregadas com Ni, Co, Fe e Mg.

Avaliando-se os resultados dos ensaios de extração, verificou-se que o tempo de residência de 4h e o volume de resina TP220 de 2% apresentaram as maiores taxas de extração de níquel e cobalto de 59,11% e 67,12%, respectivamente, enquanto as taxas de extração do ferro e magnésio foram de 23,28% e 21,72%, respectivamente, indicando uma boa seletividade entre os metais durante o processo de extração.

5.6 Eluição

Com a solução resultante (2 L), foram realizados os ensaios de eluição, cujos teores de níquel, cobalto, ferro e magnésio na solução resultante, ou eluente, estão demonstrados na tabela 58. Na figura 124 é apresentada a representação gráfica dos teores dos metais em relação ao BV.

Tabela 58 - Teores dos metais no eluente

Metal	BV ("Bed Volume")				
	1	2	3	4	5
Ni	1,85	11,78	1,15	0,52	0,12
Co	1,27	9,82	0,94	0,38	0,08
Fe	4,22	6,35	1,07	0,84	0,13
Mg	5,25	7,42	1,14	0,88	0,18

Figura 124 - Teores dos metais no eluente em relação ao BV.

Avaliando-se os resultados dos ensaios de eluição verifica-se que para todos os metais o BV de 2 apresenta os melhores resultados, mas como este processo tem o intuito da remoção de todo o metal adsorvido, o BV de 3 representa a maior taxa de eluição, pois indica que removeu os metais nos valores de BV 1 e 2 somados. Na figura 125, verifica-se o processo de eluição com BV 3. Observa-se pela coloração a remoção ou estripagem dos metais adsorvidos.

Figura 125 - Eluição das resinas TP220.

5.7 Conciliação dos processos de extração de níquel e cobalto

Na figura 126 é apresentado o fluxograma geral do processo desenvolvido com as variáveis que apresentaram o melhor desempenho e, na tabela 59, são apresentados os melhores rendimentos de cada etapa do processo desenvolvido, assim como o cálculo do rendimento global para cada metal e as seletividades globais Ni:Fe, Ni:Mg, Co:Fe e Co:Mg.

Figura 126 - Fluxograma do processo de extração de Ni, Co, Fe e Mg do rejeito Caron.

Tabela 59 - Rendimentos globais e seletividades.

Etapa do Processo	Rendimentos (%)			
	Ni	Co	Fe	Mg
Lixiviação e Neutralização	58,69%	82,80%	1,59%	14,75%
RIP e Eluição	59,11%	67,12%	23,28%	21,72%
Rendimento Global	34,69%	55,58%	0,37%	3,20%
Seletividade Ni:Fe	93,72			
Seletividade Ni:Mg	10,83			
Seletividade Co:Fe	150,14			
Seletividade Co:Mg	17,35			

6 CONCLUSÕES

1. A umidade das diversas amostras de rejeito Caron apresentou o valor médio de 68,09%, desvio padrão de 3,438 e mediana de 68,06%. Os valores da umidade (base úmida), apresentaram-se com uma distribuição uniforme por toda a barragem de rejeitos.
2. Os teores de níquel nas amostras de rejeito Caron apresentaram valores médios de 0,4881%, desvio padrão de 0,04808 e mediana de 0,485, demonstrando que o teor de níquel está com distribuição uniforme por toda a barragem de rejeitos.
3. As concentrações de cobalto nas amostras de rejeito Caron apresentaram valor médio de 0,07056%, desvio padrão de 0,006169 e mediana de 0,071, indicando uma distribuição uniforme por toda a barragem.
4. Os teores de ferro nas amostras de rejeito Caron apresentam valores médios de 33,31%, desvio padrão de 2,836 e mediana de 34,0 apresentando uma distribuição uniforme por toda a barragem.
5. As concentrações de magnésio nas amostras de rejeito Caron apresentaram valores médios de 6,351, desvio padrão de 1,488 e mediana de 5,83, também indicando distribuição uniforme por toda a barragem de rejeitos.
6. A granulometria das amostras coletadas nos furos selecionados aleatoriamente apresentou valores do d_{90} com pouca variação entre si, sendo o valor médio mínimo de 43 μm e o valor máximo médio de 93 μm . Com isto, verifica-se que a granulometria do material contido na barragem é homogênea e bem distribuída pela barragem.
7. A caracterização do rejeito Caron contido na barragem demonstra que o processo hidrometalúrgico desenvolvido poderá utilizar todo o material estocado, evitando-se a partição do material.
8. A lixiviação do níquel e do cobalto é dependente do tempo de residência, da concentração de ácido sulfúrico e da temperatura. Nas condições avaliadas, a maior eficiência de extração de níquel é de 55,85% e do cobalto foi de 72,11%.
9. A lixiviação do ferro é dependente da concentração de ácido sulfúrico e da temperatura. O maior valor de eficiência é de 27,28%.
10. A lixiviação do magnésio é dependente do tempo de residência, temperatura e concentração do ácido sulfúrico e o maior valor de eficiência é de 33,11%.
11. Na etapa de lixiviação, os melhores resultados de seletividade Ni:Fe, Ni:Mg, Co:Fe e Co:Mg são 12,45, 2,08, 16,03 e 4,23 respectivamente.
12. As condições da lixiviação que apresentam os maiores níveis de extração de níquel e cobalto e com bons resultados de seletividade em relação ao ferro e magnésio são tempo de residência de 48 horas, temperatura de 80 °C e concentração de ácido sulfúrico de 50 g/L.
13. Para a etapa de neutralização os melhores parâmetros de elevação de pH são tempo de residência de 3 horas e massa de calcário de 270 g.
14. No processo de troca iônica em polpa (RIP), a eficiência de extração é dependente do volume de resina e do tempo de residência. Para o níquel, o maior valor obtido de extração

foi de 59,11% e para o cobalto 67,12%, ambos nas mesmas condições de volume de resina de 2% e tempo de residência de 4 horas. Nestas mesmas condições as extrações de ferro e magnésio são de 23,28% e 21,72% respectivamente, apresentando uma boa seletividade para com o níquel e cobalto.

15. Na eluição, o parâmetro “*Bed Volume*” de 3 foi o que apresentou os melhores resultados de remoção dos metais das resinas de troca iônica.
16. Conciliando os processos de lixiviação saturada, neutralização, resina de troca iônica em polpa e eluição, os rendimentos de extração de níquel, cobalto, ferro e magnésio são de 34,69%, 55,58%, 0,37% e 3,20%, respectivamente, enquanto a seletividade Ni:Fe, Ni:Mg, Co:Fe e Co:Mg é de 93,72, 10,83, 150,15 e 17,37 respectivamente.
17. Este estudo pode alavancar o conhecimento das áreas envolvidas com o intuito de mitigar o impacto sócio – ambiental que barragens de rejeitos podem proporcionar no cotidiano, principalmente de comunidades que vivem nas proximidades, além de tornar os processos minero - metalúrgicos mais sustentáveis, com a geração de maiores receitas através da recuperação dos metais de interesse e da promoção da economia circular com o aproveitamento dos materiais refratários, podendo alcançar níveis de eliminação total da geração de rejeitos.
18. A viabilidade econômica deste projeto apresenta-se de forma positiva somente se forem consideradas as recuperações, além do níquel e do cobalto, a do cobre e do escândio, além da obtenção dos materiais cimentícios, já que o investimento necessário é muito elevado, pois a rota tecnológica a ser desenvolvida deve processar todo o rejeito gerado na planta fabril atual, que é em torno de 2,5 milhões de toneladas por ano e mais 1,6 milhões de toneladas anuais, oriundas da própria barragem de rejeitos para que ao final da vida útil da mina, que é de 34 anos, seja totalmente descomissionada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINOX - Associação Brasileira do Aço Inoxidável. ABINOX, 2020. Disponível em: <www.abinox.org.br>. Acesso em: 27 Março 2020.

ABRACAL. Associação Brasileira dos Produtores de Calcário Agrícola. ABRACAL, 2018. Disponível em: <www.abracal.com.br>. Acesso em: 6 Maio 2020.

ADAMS, M. D. *Advances in Gold Ore Processing*. Londres: Elsevier, v. 15, 2005. 1027 p.

AL-THYABAT, S. et al. Adaptation of minerals processing operations for lithium-ion (LiBs) and nickel metal hydride (NiMH) batteries recycling: Critical review. *Minerals Engineering*, Ma'an, v. 45, p. 4 - 17, 2013.

ARAÚJO, L. A. *Manual de Siderurgia: Produção*. 2ª. ed. São Paulo: Arte & Ciência, v. 1, 1997. 470 p.

ASSEFI, M. et al. Pyrometallurgical recycling of Li-ion, Ni–Cd and Ni-MH batteries: A minireview. *Green and Sustainable Chemistry*, Sidney, v. 24, p. 26 - 31, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro. 2004.

BALLESTER, A.; VERDEJA, L. F.; SANCHO, J. *Metalurgia Extractiva: Fundamentos*. Madrid: Editorial Sintesis, v. 1, 2000. 507 p.

BARANDAS, A. P. M. G.; VALVERDE JR., I. M.; AFONSO, J. C. Recuperação de cádmio de baterias níquel - cádmio via extração seletiva com tributilfosfato (TBP). *Química Nova*, Rio de Janeiro, v. 30, p. 712 - 717, 2007.

BATTERY Association of Japan. Battery Association of Japan, 2020. Disponível em: <www.baj.org.jp>. Acesso em: 1 Abril 2020.

BELL, T. The Biggest Nickel Producers. The Balance, 2019. Disponível em: <www.thebalance.com>. Acesso em: 9 Abril 2020.

BERNARDES, A. M.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. Recycling of batteries: a review of current processes and technologies. *Journal of Power Sources*, Porto Alegre, v. 130, p. 291 - 298, 2003.

BETTS, J. Online Mineral Museum. Online Mineral Museum, 2020. Disponível em: <www.johnbett-fineminerals.com>. Acesso em: 7 Abril 2020.

BOA, T. M. R. F. Recursos minerais de Minas Gerais - níquel e cobalto. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 24. 2018.

BOLFARINE, H.; BUSSAB, W. O. Elementos de amostragem. 1ª. ed. São Paulo: Blucher, 2015. 274 p.

BOTELHO JUNIOR, A. B.; ESPINOSA, D. C. R.; DREISINGER, D. B. A Review of nickel, copper, and cobalt recovery by chelating ion exchange resins from mining processes and mining tailings. Mining, Metallurgy & Exploration, São Paulo, 2018.

BRETT, A. M. O.; BRETT, C. M. A. Electroquímica: Princípios, Métodos e Aplicações. Coimbra: Oxford University Press, 1996. 379 - 382 p.

CANNONI, R. V. Relatório de Visita: SLN Doniambo, Nova Caledônia. Votorantim Metais. São Paulo. 2010.

CANNONI, R. V. Relatório de visita Xstrata Nikkelverk Kristiansand Noruega. Votorantim Metais. São Paulo, p. 30. 2011.

CANNONI, R. V. Relatório de Benchmarking: Ravensthorpe Austrália. Votorantim Metais. São Paulo. 2012.

CANNONI, R. V.; FOGGIATTO, B. Sondagem da barragem do Jacuba. Votorantim Metais. Niquelândia, p. 85. 2006.

CHAVES, A. P. et al. Caracterização tecnológica do resíduo da lixiviação de minério de níquel de Niquelândia: aproveitamento de sub-produtos e redução do impacto ambiental. Escola Politécnica d Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas, Laboratório de Tratamento de Minérios e resíduos industriais. São Paulo. 2004.

CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. São Paulo: ABM, 1996. 394 424 p.

CORREIA, A. Amostragem na mineração: o que é, qual sua importância e quais são os passos recomendados. Instituto Minere, 21 Dezembro 2018. Disponível em: <www.institutominere.com.br>. Acesso em: 6 Maio 2020.

COTO, O. et al. Cobalt and nickel recoveries from laterite tailings by organic and inorganic bio-acids. Hydrometallurgy, Havana, v. 94, p. 18 - 22, 2008.

CRUNDWELL, F. K. et al. Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum-Group Metals. Londres: Elsevier, 2011. p. 21 - 27.

DAVIS, J. R. Nickel, cobalt, and their alloys. Novelty: ASM International, 2000. 7 - 13 p.

DELL, R. M.; RAND, D. A. J. Understanding Batteries. Londres: Royal Society of Chemistry, 2001. 130 - 140 p.

DOMPIERI, M. Análise de complexidade aplicada à antecipação de crises no mercado de bens minerais. Tese (Doutorado). São Paulo: Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, 2014. 160 p.

DREISINGER, D. Amospheric leaching of nickel and cobalt from saprolite ores using starved acid technology. 1st International Process Metallurgy Conference (IPMC 2016). West Java, Indonésia: [s.n.]. 2016. p. 1 - 10.

DREISINGER, D.; CLUCAS, J. The starved acid leaching technology (SALT) for recovery of nickel and cobalt from saprolites and Caron plant residues. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2013. San Antonio: [s.n.]. 2013. p. 413 - 424.

DUPONT. Dupont. Dupont, 2020. Disponível em: <www.dupont.com>. Acesso em: 12 Maio 2020.

EVERHART, J. L. Engineering properties of nickel and nickel alloys. Nova York: Plenum Press, 1971. 229 p.

FARROKHPAY, S.; FILIPPOV, L.; FORNASIERO, D. Pre-concentration of nickel in laterite ores using physical separation. Minerals Engineering, Lorraine, v. 141, 2019.

FRICKE, J. The world of batteries. Function, Systems, Disposal. Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien. Hamburgo. 2007.

FRÖHLICH, S.; SEWING, D. The BATENUS process for recycling mixed battery waste. Journal of Power Sources, Siershahn, v. 57, p. 27 - 30, 1995.

GAMBURG, Y. D.; ZANGARI, G. Theory and practice of metal electrodeposition. Nova York: Springer, 2011. 290 - 295 p.

GOMES, R. A. M. Aumento da recuperação de Níquel, Cobalto e Cobre nas etapas de pirometalurgia e hidrometalurgia da Votorantim Metais Níquel - Niquelândia. Belo Horizonte: Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2010. 86 p.

GOMIDE, R. Operações Unitárias. Operações com sistemas sólidos granulares. São Paulo: FEI Gráfica, v. 1, 1983. 293 p.

GRINSTEAD, R. R. Selective absorption of copper, nickel, cobalt and other transition metal ions from sulfuric acid solutions with the chelating ion exchange resin XFS 4195. Hydrometallurgy, Amsterdam, v. 12, p. 387 - 400, 1984.

GUERRERO, Y. F.; DOMÍNGUEZ, E. S.; RAMIREZ, E. L. Evaluación experimental de la recuperación del cobalto con ácido orgánico a partir de las colas de la empresa "Rene Ramos Latour" de Nicaro. Tecnología Química, Santiago de Cuba, v. 26, p. 76 - 82, 2006.

GUPTA, C. K. Chemical Metallurgy: Principles and Practice. Berlim: Wiley, 2003. 824 p.

HENCKENS, M. L. C. M.; WORRELL, E. Reviewing the availability of copper and nickel for future generations. The balance between production growth, sustainability and recycling rates. Journal of Cleaner Production, Utrecht, Abril 2020.

INDOFERRO, P. PT. Indoferro Nickel Pig Iron Plant. PT. Indoferro. Cilegon, Indonésia, p. 14. 2010.

INSG - International Nickel Study Group. INSG, 2020. Disponível em: <www.insg.org>. Acesso em: 26 Março 2020.

ISSF - International Stainless Steel Forum. ISSF, 2020. Disponível em: <www.worldstainless.org>. Acesso em: 27 Março 2020.

JIAN PAN, H. T. et al. Improved beneficiation of nickel and iron from a low-grade saprolite laterite by addition of limonitic laterite ore and CaCO₃. Journal of Materials Research and Technology, Changsha, p. 12, Dezembro 2019.

KAHN, H. Caracterização em resíduo do processo piro/hidrometalúrgico - níquel eletrolítico. Laboratório de Caracterização Tecnológica - LCT. São Paulo, p. 45. 2007.

KALIVODA, M. et al. Air Pollution Effects of Poultry Litter Incineration. APCD. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/poultrylitterincineration09>>. Acesso em: 21 abr. 2020.

KRAMAR, D. et al. The machinability of nickel - based alloys in high pressure jet assisted (HPJA) turning. Metalurgija, Liubliana, v. 52, p. 512 - 514, 2013.

LANXESS. Lanxess Energizing Chemistry. Lanxess Energizing Chemistry, 2020. Disponível em: <www.lanxess.com>. Acesso em: 12 Maio 2020.

LAVINSKY, R. Wikipedia. Wikipedia, 2020. Disponível em: <www.es.wikipedia.org>. Acesso em: 7 Abril 2020.

LIN, S. L. et al. Characterization of spent nickel-metal hydride batteries and a preliminary economic evaluation of the recovery processes. Journal of the Air & Waste Management Association, Taiwan, v. 66, n. 3, p. 296 - 306, 2016.

LITTLEJOHN, P.; VAUGHAN, J. Selectivity of commercial and novel mixed functionality cation exchange resins in mildly acidic sulfate and mixed sulfate-chloride solution. Hydrometallurgy, St. Lucia, Queensland, Australia, v. 124, p. 90 - 99, 2012.

LITTLEJOHN, P.; VAUGHAN, J. Recovery of nickel and cobalt from laterite leach tailings through resin-in-pulps scavenging and selective ammoniacal elution. Minerals Engineering, St. Lucia, v. 54, p. 14 - 20, 2013.

LLOYD, L. Handbook of industrial catalysts. Londres: Springer, 2011. 490 p.

LME. LME, 2020. Disponível em: <www.lme.com>. Acesso em: Março 2020.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. Tratamento de Minérios. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2004. 858 p.

MANO, E. S. Caracterização Tecnológica de Produtos de Beneficiamento de Minério de Ni-Cu-Co de Fortaleza de Minas, MG (Dissertação Mestrado). São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mineral, 2002.

MANO, E. S. Influência dos argilominerais dos minérios de níquel lateríticos na recuperação deste metal. São Paulo: Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo., 2013. 144 p.

MCDONALD, R. G.; WHITTINGTON, B. I. Atmospheric acid leaching of nickel laterites review. Part I. Sulfuric acid technologies. Hydrometallurgy, v. 91, p. 35 - 55, 2008.

MIHOVILOVIC, E. M. D. Hidrometalurgia - fundamentos, procesos y aplicaciones. Santiago: Andros Impresores, 2001. 947 p.

MILLEN JR., W. Curso de galvanoplastia. 9. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Tratamentos de Superfície, 1995.

MINERAL COMMODITY SUMMARIES. U.S. Geological Survey. Reston, p. 200. 2020.

MOORE, J. J. Chemical Metallurgy. 2ª. ed. [S.l.]: Butterworths, 1990. 443 p.

MOOSAKAZEMI, F. et al. Development of an environmentally friendly flowsheet for the hydrometallurgical recovery of nickel and aluminum from spent methanation catalyst. Journal of Cleaner Production, Tehran, v. 244, 2020.

NADOLL, P.; MAUK, J. L. Wüstite in a hydrothermal silver-lead-zinc vein, Lucky Friday mine, Coeur d'Alene mining district, USA. American Mineralogist, Auckland, p. 261 - 267, 2011.

NAKAJIMA, K. et al. Global distribution of material consumption: Nickel, copper, and iron. Resources, Conservation & Recycling, Ibaraki, v. 133, p. 369 - 374, 2018.

NICKEL. BHP, 2020. Disponível em: <www.bhp.com>. Acesso em: 14 abr. 2020.

NICKEL Institute. Nickel Institute, 2020. Disponível em: <www.nickelinstitute.org>. Acesso em: Março 2020.

NICKEL S-Pellets. Vale, 2020. Disponível em: <www.vale.com>. Acesso em: 14 abr. 2020.

NURMI, P. Bioleaching. Talvivaara. Sotkamo. 2011.

OXLEY, A.; SMITH, M. E.; CACERES, O. Why heap leach nickel laterites? Minerals Engineering, Londres, v. 88, p. 53 - 60, 2016.

PLECHER, H. Statista. Statista, 2020. Disponível em: <www.statista.com>. Acesso em: 26 Março 2020.

POURBAIX, M. Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solution. 2^a. ed. Houston: NACE International, 1974. 648 p.

PUROLITE. Purolite. Purolite, 2020. Disponível em: <www.purolite.com>. Acesso em: 12 Maio 2020.

RAO, M. et al. Carbothermic reduction of nickeliferous laterite ores for nickel pig iron production in China: A review. JOM, Changsha - China, v. 65, p. 1573 - 1583, 2013.

RICHTER, D. Uma rota de recuperação de metal a partir de escória secundária da produção de ferromnês. São Paulo: Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009. 138 p.

RIYIS, M. T. et al. Comparação entre ferramentas de amostragem de solo "direct push" em investigações geoambientais de áreas contaminadas. III Congresso Internacional do Meio Ambiente Subterrâneo, São Paulo, 2013. 4.

ROBB, L. Introduction to ore-forming processes. Oxford: Blackwell Publishing, 2005. 373 p.

ROSKILL. Roskill, 2019. Disponível em: <www.roskill.com>. Acesso em: Março 2020.

ROZÁRIO, A.; SILVA, R. K. S.; FREITAS, M. B. J. G. Recycling of nickel from NiOOH/Ni(OH)₂ electrodes of spent Ni–Cd batteries. Journal of Power Sources, Vitória, v. 158, p. 754 - 759, 2006.

RUDNIK, E.; NIKIEL, M. Hydrometallurgical recovery of cadmium and nickel from spent Ni-Cd batteries. Hydrometallurgy, Cracóvia, v. 89, p. 61 - 71, Maio 2007.

RYDBERG, J.; MUSIKAS, C.; CHOPPIN, G. R. Principles and Practices of Solvent Extraction. Nova York: Marcel Dekker, 1992. 584 p.

SANCHO, J.; VERDEJA, L. F.; BALLESTER, A. Metalurgia Extractiva - Procesos de Obtención. Madrid: Editorial Sintesis, v. 2, 2003. 428 p.

SAWE, B. E. Top 10 Nickel Consuming Countries. World Atlas, 2019. Disponível em: <www.worldatlas.com>. Acesso em: 9 Abril 2020.

SCHMAL, M. Catálise heterogênea. Rio de Janeiro: Synergia, 2012. 358 p.

SEITOVIRTA, M. Handbook of Stainless Steel. Espoo: Outokumpu, 2013.

SILVEIRA, G. M.; CHAVES, A. P. Teoria e Práticas do Tratamento de Minérios: A Flotação no Brasil. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 4, 2013. 510 p.

STEPAN, J. An analysis of Nickel price variation and its impact on the global economy. XVII International Scientific Conference. Cracóvia: AGH Faculty of Management. 2015.

TAKANO, C. et al. Recuperação de Ni de rejeito Caron contendo 0,45%Ni pelo processo de "Thermal Upgrading". Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 69. 2011.

TENÓRIO, J. A. S.; ESPINOSA, D. C. R. Recovery of Ni-based alloys from spent NiMH batteries. Journal of Power Sources, São Paulo, v. 108, p. 70 - 73, Dezembro 2001.

The World Nickel Factbook 2018. INSG. [S.l.], p. 51. 2019.

THOMAS, W. Mining Chemicals Handbook. 2ª. ed. Nova York: Cytec Industries, 2010. 505 p.

TICIANELLI, E. A.; GONZALEZ, E. R. Eletroquímica. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1998. 177 - 188 p.

VALE Business. Vale, 2020. Disponível em: <www.vale.com>. Acesso em: 9 Abril 2020.

VOTORANTIM METAIS. Apostila de Processo - Treinamento Operacional. Votorantim Metais. Fortaleza de Minas, p. 15. 2008.

WANKAT, P. C. Separation Process Engineering. 3ª. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2012. 958 p.

WATANABE, T. et al. Direct reduction of garnierite ore for production of ferro-nickel with a rotary kiln at Nippon Yakin Kogyo Co.,Ltd., Oheyama works. Interentional Journal of Mineral Processing, Kawasaki, Japão, v. 19, p. 173 - 187, 1987.

XIE, Y. et al. Recovery of nickel, copper and cobalt from low grade Ni-Cu sulfide tailings. Hydrometallurgy, Lanzhou, v. 80, p. 54 - 58, 2005.

YANG, Q. Z. et al. Sustainable recovery of nickel from spent hydrogenation catalyst: economics, emissions and wastes assessment. Journal of Cleaner Production, Singapura, v. 19, p. 365 - 375, 2011.

YILDIRIM, H. et al. Nickel Pig Iron production from lateritic nickel ores. INFACON XIII, 13th International Ferro Alloys Congress, Almati, Cazaquistão, p. 237 - 244, 2013.

ZAINOL, Z.; NICOL, M. J. Comparative study of chelating ion exchange resins for the recovery of nickel and cobalt from laterite leach tailings. Hydrometallurgy, Penang, v. 96, p. 283 - 287, 2009.