

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.
PPGEM

Tese de Doutorado

**ESTUDO DA RECUPERAÇÃO DE METAIS PRESENTES NA ESCÓRIA
DE AÇO INOX FINA POR BENEFICIAMENTO MAGNÉTICO**

Por

Fabício Gehrke da Silva

Porto Alegre, 2008

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.
PPGEM

Tese de Doutorado

**ESTUDO DA RECUPERAÇÃO DE METAIS PRESENTES NA ESCÓRIA
DE AÇO INOX FINA POR BENEFICIAMENTO MAGNÉTICO**

Por
Fabrício Gehrke da Silva

Orientador: Prof. Dr.-Ing Carlos Hoffmann Sampaio

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Erwin Francisco Tochtrop Jr.

Prof. Dr. Rubens Muller Kautzmann

Prof. Dr. Washington Aliaga Pizarro

Porto Alegre, 2008

Aos Meus Pais e Irmão.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Ing. Carlos Hoffmann Sampaio pela orientação, estímulo, dedicação e esforço pessoal proporcionado.

À GERDAU Aços Finos Piratini pela disponibilidade de seu pessoal e do material, sem o qual este trabalho não poderia ter sido concretizado.

À CAPES pelo apoio financeiro, e pela oportunidade de realizar os experimentos na conceituada universidade RWTH-Aachen.

Aos colegas e professores da RWTH-Aachen, os quais ajudaram muito no meu desenvolvimento pessoal na Alemanha, tanto como no desenvolvimento do meu trabalho.

Aos meus pais e irmão pelo apoio e pela confiança que sempre depositaram em mim, e por me estimularem nos momentos mais críticos.

Aos colegas e amigos do LAPROM pelas sugestões, observações valiosas e pela paciência.

À UFRGS por abrir as portas de sua instituição para que um sonho se concretizasse.

Enfim, a todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu agradecimento.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 A escória.....	4
2.1.1 Estrutura e Constituição das Escórias.....	6
2.1.2 Escória de aço inoxidável em forno de arco elétrico, e suas características.	12
2.1.3 Usos e processos de recuperação de escórias.	20
2.2 Separação Magnética:.....	23
2.3 Princípios da separação por Força Magnética	24
2.3.1 Ferromagnetismo	25
2.3.2 Paramagnetismo	26
2.3.3 Diamagnetismo.....	27
2.4 Grandezas magnéticas	27
2.5 Magnetos e geração do campo magnético.....	28
2.6 Partículas submetidas á ação de campo magnético	29
2.7 Classificação magnética	34
2.8 Separadores magnéticos	35
2.8.1 Separador magnético de baixa intensidade a seco.....	36
2.8.2 Separador magnético de baixa intensidade a úmido.....	36
2.8.3 Separador magnético de alta intensidade a seco.....	38
2.8.4 Separador por Rolo Magnético.....	38
2.9 Variáveis do beneficiamento magnético.....	40
2.9.1 Intensidade de Campo Magnético	41
2.9.2 Alimentação.....	41
2.10 Avanços na separação magnética	42
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1 Coleta e preparação de escória	44
3.2 Beneficiamento magnético da escória	45
3.2.1 Separador magnético, rolo induzido.....	45
3.2.2 Separador magnético, rolo com magnetos permanentes	47
3.2.3 Separador magnético de alta intensidade.....	48
3.3 Análise química	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51

4.1 Caracterização da Amostra.....	52
4.2 Caracterização Magnética.....	53
4.2.1 Análise do teor de Fe, Cr e Ni totais para o concentrado magnético e rejeito	55
4.2.2 Análise da recuperação de Fe, Cr e Ni	57
4.2.3 Teor e recuperação de Fe, Cr e Ni metálicos.....	60
4.3 Aplicação de beneficiamentos magnéticos seqüenciais com a diminuição do campo magnético	62
4.3.1 Análise do teor de Fe, Cr e Ni totais para o concentrado magnético e rejeito	64
4.3.2 Análise da recuperação de Fe, Cr e Ni	66
4.3.3 Análise para teor e recuperação de Fe, Cr e Ni metálicos.....	68
4.4 Beneficiamento magnético com equipamentos industriais em escala laboratorial	70
4.5 Comparativo entre as técnicas	72
4.5.1 Concentração de Ferro.....	72
4.5.2 Concentração de Cromo	74
4.5.3 Concentração de Níquel	76
5 CONCLUSÕES	78
REFERÊNCIAS	80
ANEXO A	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Estrutura cristalina da sílica em estado sólido “A” e fundida “B” (TURKDOGAN, 1996).....	7
Figura 2.2: Representação da estrutura cristalina da sílica após despolimerização (TURKDOGAN, 1996).	8
Figura 2.3: Esquema da produção de aço inoxidável por forno de arco elétrico (ZETTERMANN, 2001)	12
Figura 2.4. Difração de raios-X de escória de aço inoxidável. (Shen, 2004).....	14
Figura 2.5: Partículas metálicas presentes na escória de aço inox (SILVA, 2002).	15
Figura 2.6: Partículas metálicas na matriz de escória MEV (SILVA, 2002).	16
Figura 2.7: Microsonda pontual de duas partículas metálicas distintas (SILVA, 2002).	17
Figura 2.8: MEV Escória de aço inoxidável aumento 200x (VILELA, 2000).....	18
Figura 2.9: Microscopia da Escória, aumento 500 vezes (VILELA, 2000).	19
Figura 2.10: Histerese.....	26
Figura 2.11. Diagrama esquemático do processo de separação magnética.	30
Figura 2.12: Campo magnético no interior de um solenóide (LUZ, 2004).	31
Figura 2.13: Indução Magnética de diferentes Espécies Mineralógicas (a) ferromagnéticas, (b) paramagnéticas e (c) diamagnéticas	33
Figura 2.14 – Demonstrativo de campo e gradiente magnéticos (LUZ, 2004)	33
Figura 2.15: Classificador Magnético Variável (AUGUSTO, 2000).	34
Figura 2.16: Classificação, características e aplicações de alguns separadores magnéticos (LUZ, 2004).	35
Figura 2.17: Separador magnético Steinert® de correia cruzada (SVOBODA, 2003).	36
Figura 2.18: Configuração dos Pólos em separadores magnéticos de tambores.	37
Figura 2.19: Separador Magnético de Tambor via Úmida IMBRAS® (A), e gráfico (B).	37
Figura 2.20: Concentrador Magnético de Alta Intensidade STEINERT® (A) e gráfico (B).	38
Figura 2.21: separador magnético de rolo induzido (LUZ, 2004).	39
Figura 2.22: Concentrador de rolo magnético permanente ERIEZ®	40
Figura 3.1: Separador magnético por rolo induzido, de bancada Carpc®	46
Figura 3.2: rolo magnetizado (A), escova de limpeza (B) e alhetas de separação (C).	47
Figura 3.3: Separador de Rolo Magnético Permanente STEINERT® e calha vibratória.	48
Figura 3.4: Separador magnético de alta intensidade STEINERT®	49
Figura 4.1: Metodologia para caracterização magnética (20 e 40 rpm)	54
Figura 4.2: Recuperação de Ferro para 20 e 40 rpm	59
Figura 4.3: Recuperação de Níquel para 20 e 40 rpm	59
Figura 4.4: Recuperação de Cromo para 20 e 40 rpm.	60
Figura 4.5: Recuperação dos elementos em estado metálico.	62

Figura 4.6: Metodologia Separação Magnética Sequencial	63
Figura 4.7: Recuperação dos elementos totais	68
Figura 4.8: Recuperação dos elementos em estado metálico.	69
Figura 4.9: Comparativo entre o beneficiamento sequencial e o simples para o elemento ferro.	74
Figura 4.10: Comparativo entre o beneficiamento sequencial e o simples para o elemento cromo.	75
Figura 4.11: Comparativo entre o beneficiamento sequencial e o simples para o elemento níquel.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Composição química de várias escórias (ALANYALI, 2006).....	10
Tabela 2.2: Fases encontradas por difração de raios-x realizada por Zettermann (2001)	14
Tabela 2.3: Microsonda pontual de duas partículas metálicas distintas.	16
Tabela 2.4: Constituintes Químicos (% mássica).....	19
Tabela 2.5: Demonstrativo da variação da intensidade de força magnética.....	32
Tabela 4.1: Teor de ferro, cromo e níquel, da escória coletada na GERDAU	52
Tabela 4.2: Distribuição granulométrica e respectivos teores de ferro, níquel e cromo.	53
Tabela 4.3: Frações mássicas para concentrados magnéticos e rejeitos.....	55
Tabela 4.4: Resultados da caracterização magnética para o concentrado.	55
Tabela 4.5: Resultados da caracterização magnética para o resíduo.....	56
Tabela 4.6: Recuperação do Ferro, do Cromo e do Níquel após concentração magnética.	57
Tabela 4.7: Teor, nos concentrados, dos elementos em estado metálico.	61
Tabela 4.8: Recuperação dos elementos em estado metálico.....	61
Tabela 4.9: Beneficiamento magnético com 1,2 Tesla.....	64
Tabela 4.10: Beneficiamento magnético com 0,8 Tesla.....	64
Tabela 4.11: Beneficiamento magnético com 0,4 Tesla.....	65
Tabela 4.12: Beneficiamento magnético com 0,2 Tesla.....	65
Tabela 4.13: Resíduo total gerado após cada beneficiamento.....	66
Tabela 4.14: Recuperação total, após cada beneficiamento.	67
Tabela 4.15: Recuperação mássica da escória.....	67
Tabela 4.17: Teor de elementos em estado metálicos	68
Tabela 4.18: Recuperação dos elementos metálicos	69
Tabela 4.19: Teor de metais nos concentrados e resíduos gerados.	70
Tabela 4.20: Recuperação mássica da escória beneficiada.	71
Tabela 4.21: Recuperação dos metais totais nos concentrados.	71
Tabela 4.22: Teor de elementos em estado metálico.....	71
Tabela 4.23: Recuperação dos elementos metálicos.	72
Tabela 4.24: Comparativo das técnicas para a concentração do Ferro.....	73
Tabela 4.25: Comparativo das técnicas para a concentração do Cromo	75
Tabela 4.26: Comparativo das técnicas para a concentração do Níquel	76

RESUMO

O presente trabalho estuda e demonstra a influência do campo magnético, sequencial e decrescente em intensidade, quando aplicado na escória de aço inoxidável para a concentração e/ou recuperação de metais. Um concentrador magnético de rolo induzido de bancada e dois equipamentos industriais em escala de laboratório foram utilizados neste trabalho. A escória de aço inoxidável foi cominuída e peneirada separando-se a fração entre 2 e 0,3 milímetros. As práticas foram realizadas em três etapas: Primeiramente seis intensidades magnéticas foram aplicadas separadamente sendo uma intensidade diferente para cada nova amostra, visando a avaliação da variação da intensidade do campo magnético na escória. Os resultados desta etapa demonstraram que a recuperação de ferro, cromo e níquel presente na escória sobe de 36,37%, 6,17%, e 16,61% para 51,78%, 16,43% e 26,79% respectivamente, para uma recuperação mássica total da escória de menos de 20%. A segunda etapa teve o objetivo de melhorar a recuperação, dos mesmos elementos, com a aplicação de concentrações magnéticas sequenciais, para os concentrados. Para tanto, a escória de aço inoxidável foi submetida a sucessivos processos de beneficiamento magnético com intensidade magnética decrescente. Quando comparada com a aplicação de um processamento magnético único, a recuperação obtida com a concentração sequencial demonstrou um considerável aumento, alcançando recuperações de 82,84% e aproximadamente 100% para ferro e níquel respectivamente, mantendo-se uma recuperação mássica total abaixo de 22% da massa total de escória. A recuperação do cromo apresentou um leve aumento não representando uma solução para a remoção deste elemento da escória. A terceira etapa deste trabalho demonstrou o processo de concentração magnética, em maior escala, com a utilização de dois equipamentos industriais em escala de laboratório: um separador magnético de alta intensidade e um de baixa intensidade, utilizados em seqüência, sendo o concentrado magnético, obtido com o equipamento de maior intensidade, submetido à separação magnética com o equipamento de menor campo. Sendo assim, observando-se os resultados obtidos, concluiu-se que o aumento na intensidade magnética é responsável por um aumento da recuperação dos elementos ferro, cromo e níquel, e ficou ainda comprovado que a aplicação de concentrações magnéticas sequenciais fornece melhores recuperações e ainda melhores opções de aplicação dependendo das necessidades do momento, quando comparadas com o processo de beneficiamento magnético simples.

ABSTRACT

This work studies the influence of magnetic field intensity on concentration of stainless steel slag in order to explore the possibility to recover metals. A laboratory magnetic induced roll and two industrial equipment in laboratorial scale were used to carry out concentrations. Experiments were accomplished in three steps: Firstly, six intensities were used to evaluate the influence of magnetic intensity over the slag. Each intensity was applied to one individual sample. The results from this study showed that recoveries of iron, chromium and nickel vary from 36.37%, 6.17% and 16.61% to 51,78%, 16,43% and 26,79% respectively with a mass total recovery of around 20%. The second phase had the objective to confirm that a sequential magnetic concentration would increase the recovery of the iron, chromium and nickel. A stainless steel slag sample was submitted to sequential magnetic processing with decreasing fields. These tests showed that recovery of metals as iron and nickel could be optimized with this sequential treatment, offering a considerable increase at the recovery values, achieving 82.84% and almost 100% of iron and nickel respectively, without compromising the total mass recovery value. The chromium recovery was also increased but do not represent a solution to remove it from the stainless steel slag. The third and final phase demonstrated the magnetic concentration process with two industrial equipments, in laboratorial scale, also in sequence, a high intensity magnet and low intensity magnet. This work demonstrates that magnetic intensity variation is responsible for recovery increase, and a sequential application of magnetic processing increase the recovery of metals, generating more application options for the concentrated depending on the necessities, when compared to a single magnetic process.

1 INTRODUÇÃO

A maioria das escórias é considerada hoje, devido aos seus constituintes, como subproduto das indústrias de ferro e aço. Dentre as escórias, pode-se dizer que as principais são as escórias de alto forno, oriunda da produção do ferro gusa, e as escórias de aciaria, provenientes da produção de aços. No mundo todo, estudos vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de concentrar materiais de valor presentes na escória. Por exemplo, através de processamentos gravimétricos (MASHANYARE 1997; SRIPRIYA 2005), magnéticos (SRIPRIYA, 2005; ALANYALI, 2006) e siderúrgicos (pirometalúrgicos) com a redução dos metais presentes na escória (GUOZHU, 2003; NAKASUGA, 2004; PARK, 2004), porém alguns deles sem muito sucesso, ou muito caros para serem implantados. Outros pesquisadores sugerem formas alternativas de disposição, ou outros usos para a escória gerando menor risco ao meio ambiente (MOTZ 2001; SHI, 2001; MASLEHUDDIN 2003; SHEN 2003; TOPKAYA 2004). A grande maioria destes estudos é direcionada à escória proveniente de alto forno ou da produção de aço comum, e não da escória de aços especiais como o aço inoxidável.

Segundo Shen H. (2003) e Proctor D.M. (2000) aproximadamente uma tonelada de escória é gerada para se produzir três toneladas de aço. A constituição da escória por elementos metálicos varia de 3 a 15% (SRIPRIYA, 2005). Quando comparada com as escórias de alto forno a quantidade total de escória de aço inox é consideravelmente menor (PROCTOR, 2000). Porém, se comparados os valores do volume de escória gerada dentre os processos de produção de aços especiais, a produção de aço inoxidável gera uma quantidade maior de escória. Além disso, por possuir cromo e níquel em sua constituição, justifica um tratamento antes de sua disposição (SHEN, 2004).

A escória de aço inoxidável vem sendo estudada e caracterizada e, mesmo sendo conhecida a existência de metais de valor agregado e com considerável potencial de contaminação ambiental nesta escória, poucos trabalhos vêm sendo publicados em relação às metodologias e aos benefícios obtidos da reciclagem ou do tratamento desta escória. Em sua grande maioria as escórias podem ser aplicadas na fabricação de cimentos, bases para pavimentação e ou asfalto, entre outros. Porém a escória de aço inoxidável, devido à presença de cromo em sua constituição, desperta desconfiança dos órgãos ambientais em relação a estes usos.

Tendo em vista a possível reutilização dos metais presentes neste resíduo, e a influência destes metais na disposição final da escória, tem-se como válido o estudo da sua recuperação, pois após o beneficiamento o resíduo poderá ser descartado de forma mais viável em termos econômicos e ambientais, ou direcionado a outros processos, devido à alteração da quantidade e teor de seus constituintes. Os materiais de valor agregado, concentrados magneticamente, podem, por sua vez, ser reaproveitados.

Na indústria da mineração, a separação magnética sequencial já é empregada, normalmente com a aplicação de campos magnéticos idênticos ou crescentes para a concentração ou limpeza de minerais (BRONKALA, 1980; LUZ, 2004; SVOBODA, 2003). A idéia da utilização de campos magnéticos decrescentes sugere efetuar uma recuperação mais eficiente dos metais e ainda devido à geração de mais de um resíduo, sendo que cada um resíduo gerado poderá ter características diferentes, os mesmos poderão ser direcionados para outro tratamento ou descartados, dependendo de suas características.

Sendo assim o presente trabalho tem como objetivo estudar a concentração (recuperação) dos elementos ferro, cromo e níquel, presentes na escória de aço inoxidável, com o uso de beneficiamento magnético; bem como de confirmar a tese de que estes beneficiamentos, quando empregados em seqüência a uma mesma amostra, resultam em uma melhor recuperação destes elementos e fornece melhores opções de aplicação dependendo das possibilidades.

A escória utilizada como amostra neste trabalho, foi gerada a partir da produção de aço inoxidável por forno de arco elétrico na empresa GERDAU, localizada na cidade de

Charqueadas no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Depois de realizada a coleta, a homogeneização e o preparo das amostras, as mesmas foram enviadas a Universidade alemã RWTH-Aachen (Reinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen) detentora de equipamentos de alta tecnologia na área de concentração magnética. Na Alemanha, as etapas de preparo de amostra e de beneficiamento magnético foram realizadas pelo autor deste trabalho. As análises químicas, por sua vez, foram realizadas pelo laboratório de metalurgia da mesma instituição, apenas com o acompanhamento do autor deste.

Após a realização dos beneficiamentos magnéticos e análises para determinação dos teores de ferro, cromo e níquel presente nos concentrados magnéticos e nos rejeitos, o beneficiamento magnético se demonstra útil para a concentração e/ou recuperação do ferro e do níquel presentes na escória tanto na forma de óxidos quanto metálicos. Porém, para o cromo, a sua recuperação só é alcançada com recuperações mássicas muito altas, não caracterizando uma ótima concentração do elemento. Outro resultado importante é a comprovação de que as concentrações magnéticas sequenciais fornecem uma melhoria significativa na recuperação do ferro e no níquel, sendo que para o cromo frações do resíduo podem ser direcionadas para novos tratamentos e ou reutilizadas de acordo com as possibilidades. Sendo assim a concentração magnética pode ser utilizada para a recuperação do ferro e do níquel presentes na escória fina de aço inoxidável, recuperação esta para reuso na produção de ferro e aço, por exemplo. Ainda, pode-se sugerir que futuros estudos para a concentração e/ou recuperação do cromo ainda possuem importância para a indústria.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A escória

As escórias já eram usadas em construção de estradas desde os tempos dos romanos. Os primeiros usos de escória relatados datam do século XVIII e início do século XX. A principal razão para esta demora estava no fato dos fabricantes de aço se preocupar apenas com o produto final, prestando muito pouca atenção para a escória. A situação mudou em tempos recentes, e a escória, tanto de alto forno quanto de aciaria, é hoje considerada não só um resíduo, mas também um sub-produto, originado no processo de produção do aço. Com uma produção de aproximadamente 12 milhões de toneladas por ano na Europa (MOTZ, 2001) e 21 milhões de toneladas por ano nos Estados Unidos (PROCTOR, 2000) a escória é considerada um bem renovável, fazendo com que alguns países e organizações a retirem do quadro de resíduos, como exemplo o *European Waste Catalogue* já não possui a escória como um resíduo (GEISELER, 1996).

Atualmente, devido a suas características físicas, as escórias têm apresentado especial valor para a indústria de construção civil. Porém, a escolha do produto não depende somente das suas qualidades como materiais de engenharia; há também a preocupação com o custo e a segurança. As escórias satisfazem esses critérios e têm uma característica adicional: sendo sub-produtos do processo, como já mencionado, elas são consideradas recursos renováveis, para diversas aplicações.

Algumas escórias, como as de alto-forno, já foram minuciosamente estudadas, e seu emprego se tornou trivial. Das escórias de produção de aço inoxidável, por outro lado, poucas informações estão disponíveis, talvez devido à limitação que a presença de óxido de cromo impõe ao seu emprego.

A escória tem papel fundamental nas reações de refino influenciando tanto na cinética das reações quanto na composição final do aço devido ao equilíbrio escória-banho. Durante a etapa de refino oxidante na fabricação de aço, ocorre inevitavelmente a oxidação de ferro e impurezas. Paralelamente, o revestimento refratário do forno é gradualmente erodido. Ocorre também a introdução de aditivos para o controle da formação da escória, como a maioria dos compostos formados nessas etapas são mais leves que o aço, eles flutuam sobre a superfície metálica e formam a camada chamada de escória. Segundo Itoh (2000) na etapa do refino do aço inoxidável pode ocorrer a oxidação do cromo e conseqüente deslocamento deste do aço para a escória modificando assim as características do aço e gerando uma perda econômica em virtude do preço do cromo que é descartado com a escória.

O metal fundido esta continuamente em contato e interagindo com a escória. A composição, a temperatura, fluidez e outros parâmetros da escória têm efeito decisivo na qualidade da liga obtida. O principal objetivo de um fabricante de aço é a produção de acordo com as especificações de cada tipo de aço. Para tanto, promove o ajuste da composição química, remoção das impurezas para a escória e formação de condições que evitam o retorno destas impurezas para o banho metálico. Por esta razão, é necessário formar uma escória de composição e espessura adequadas para a obtenção de um aço de alta qualidade.

A escória de composição desejada é formada pela introdução de uma quantidade calculada de aditivos (formadores de escória). Quando necessário, um procedimento de remoção de escória é realizado, isto é, uma quantidade definida de escória é removida do forno e uma nova escória de composição e propriedades desejadas é formada através do uso de quantidades medidas de adições particulares.

Os principais materiais formadores de escória, segundo Kudrin (1985), são:

- Aditivos e oxidantes como calcário, cal, bauxita, fluorita, minérios de ferro e manganês, entre outros, podendo conter CaCO_3 , CaO , Al_2O_3 , CaF_2 , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , MnO_2 , etc.
- Produtos de oxidação das impurezas adicionadas no forno junto com a carga (sucata e ferro-gusa): silício na forma de SiO_2 , manganês na forma de MnO ,

fósforo como fosfatos, etc.

- Produtos da erosão do refratário.
- Sucata oxidada, FeO, Fe₂O₃ e Fe(OH)₂.

Os resultados das análises químicas das amostras de escória são geralmente reportados em relação à composição de massa, com as análises sendo dadas em termos de óxidos estáveis (Fe₂O₃, CaO, MnO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, Cr₂O₃, TiO₂, P₂O₅, Na₂O, etc) ou elementos puros. A composição química das escórias de aço varia muito de porção a porção de escória solidificada, e ainda do local da sua produção. Como resultado, é muito difícil obter amostras representativas deste material.

Fórmulas de compostos complexos são frequentemente usadas na descrição dos processos de fabricação de aço onde a escória está presente no estado fundido. As fórmulas químicas, isto é, FeO ou (CaO)₂.SiO₂, não informam se estes compostos estão presentes nas escórias líquidas na forma de moléculas ou íons. Elas somente refletem as proporções de massa dos elementos nas escórias. (ZETTERMANN, 2001)

2.1.1 Estrutura e Constituição das Escórias

Turkdogan (1996) demonstra que as propriedades físico-químicas das escórias fundidas são influenciadas por sua estrutura de rede. A estrutura da escória consiste de uma rede tridimensional de óxidos de elementos formadores de rede. Eles são caracterizados pelo pequeno raio iônico e pelas mais altas valências iônicas possíveis, e são envolvidos por quatro átomos de oxigênio, somente na forma de um tetraedro (número de coordenação 4). A rede é formada de maneira que um átomo de oxigênio participe de dois tetraedros ao mesmo tempo. Um típico formador de rede é o silício, nas escórias de alto-forno vítreas, ele forma tetraedros SiO₄⁴⁻, grupos Si₂O₇⁶⁻, cadeias e outros produtos de polimerização.

A estrutura tridimensional se repete regularmente na estrutura cristalina. Na sílica líquida, os tetraedros SiO₂ estão agrupados irregularmente, como ilustrado na figura 2.1, “A” representa a formação cristalina da sílica sólida e “B” da sílica fundida (líquida).

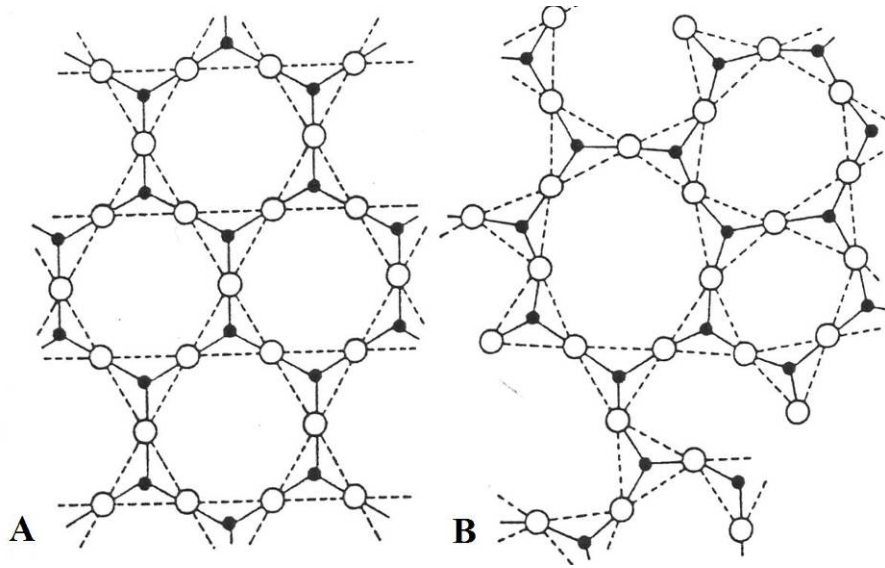


Figura 2.1: Estrutura cristalina da sílica em estado sólido “A” e fundida “B” (TURKDOGAN, 1996).

As valências negativas destes grupos aniônicos são neutralizadas pelas valências positivas dos cátions. Eles são chamados modificadores de rede. Em geral, eles têm raio iônico maior e números de coordenação maiores que os formadores de rede e na maioria das vezes estão situados nas cavidades da rede. Um típico modificador de rede na escória de alto forno é o íon Ca^{++} com número de coordenação seis. Quanto maior for o teor de modificadores de rede, menor será o grau de polimerização do tetraedro SiO_4^{4-} formador de rede.

Segundo citado por Zettermann (2001), o estado da ligação dos outros principais componentes da escória de alto-forno, que são alumínio e magnésio, desempenha um papel importante. Estes dois metais anfóteros aparecem em silicatos com números de coordenação quatro e seis. Suas ligações na escória como formadores de rede (AlO_4^{5-} e MgO_4^{6-}) ou como modificadores de rede (Al^{3+} e Mg^{2+}) têm sido investigadas. Escórias cal-silicato são formadas em processos de fabricação de aço empregando sucata e/ou ferro-gusa baixo fósforo.

A adição de óxidos metálicos como CaO , FeO e MgO à sílica líquida provoca quebra da rede de silicatos. A despolimerização parcial da rede de silicato com a adição de um óxido metálico está ilustrada na figura 2.2.

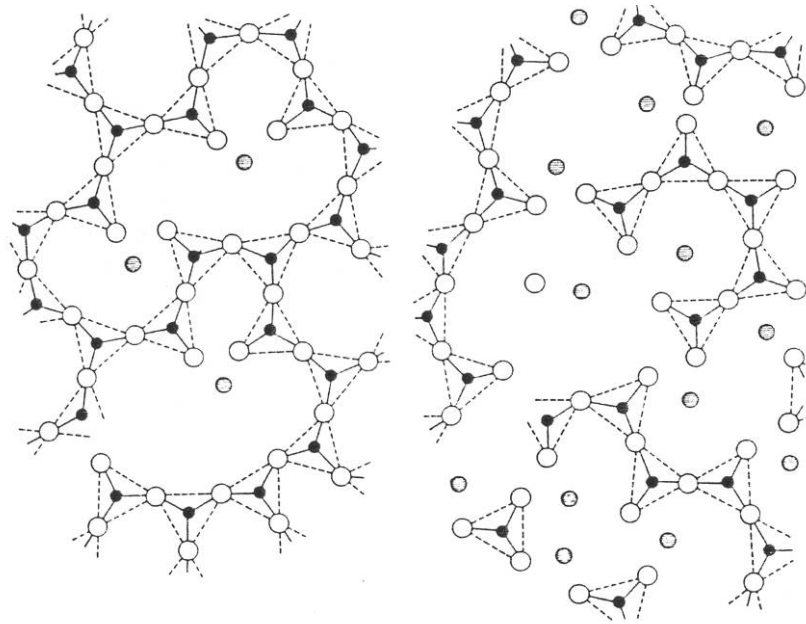


Figura 2.2: Representação da estrutura cristalina da sílica após despolimerização (TURKDOGAN, 1996).

Em concentrações baixas, Al_2O_3 se comporta como um modificador de rede e forma cátions Al^{3+} . Em concentrações mais altas, o alumínio entra na estrutura tetraédrica com o silício. Para baixas concentrações de fósforo nas escórias de aço, os íons fosfato PO_4^{3-} são incorporados na rede de silicatos. Em escórias de aço, o enxofre existe como íon sulfeto S^{2-} . O íon sulfato SO_4^{2-} existe em escórias somente sob condições altamente oxidantes e na ausência de ferro ou qualquer outro metal oxidável (TURKDOGAN, 1996).

Uma amostra de escória é constituída por três fases principais: ferrita dicálcica ($2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$), silicato dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) e wustita (FeO) ou magnésio-wustita [$(\text{Fe},\text{Mg},\text{Mn})\text{O}$].

O silicato dicálcico forma a matriz. Os tamanhos de grãos destas fases são variáveis. Em algumas regiões, os cristais são grandes e bem definidos. Na maior parte, entretanto, são finos e os contornos de grão são frequentemente indistintos. Isto também é confirmado pelo Slag Atlas (1995), que afirma que a composição mineral da escória do forno elétrico a arco é particularmente caracterizada por precipitados de silicato dicálcico. Com basicidades mais baixas, precipitados de melilita (solução sólida de $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ e $2\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$) e merwinita ($3\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$) ocorrem.

A wustita, que é termodinamicamente instável a altas temperaturas em um ambiente

oxidante, existe devido ao equilíbrio entre Fe, FeO e Fe₂O₃ durante o processo de fabricação do aço. Uma vez que a escória é separada do aço, o FeO se torna instável e oxida formando Fe₂O₃. O ferro trivalente é capaz de combinar com o cálcio e alumina para produzir uma fase ferrita no resfriamento desde a fusão, formando ferritas cálcicas, ferrita-alumino-cálcicas, ou irá para solução substituindo a alumina (MURPHY, 1997).

De acordo com Kudrin (1985), as análises minerais de escórias de aço provenientes de vários processos têm mostrado que os seguintes compostos são os mais frequentemente encontrados nas amostras, pode ser verificado que tais compostos podem apresentar estruturas cristalinas e planos de cisalhamento bastante distintos entre si..

- silicatos: FeO.SiO₂; (FeO)₂.SiO₂; MnO.SiO₂; (MnO)₂.SiO₂; (CaO)₂.SiO₂; (CaO)₃.SiO₂; MgO.SiO₂; (MgO)₂.SiO₂ e Al₂O₃.SiO₂.
- fosfatos: (FeO)₃.P₂O₅; (MnO)₃.P₂O₅; (CaO)₃.P₂O₅; (CaO)₄.P₂O₅ e (MgO)₃.P₂O₅.
- aluminatos: FeO.Al₂O₃; CaO.Al₂O₃ e MgO.Al₂O₃
- ferritas: FeO.Fe₂O₃; CaO.Fe₂O₃; (CaO)₃.Fe₂O₃; (CaO)_m.(Fe₂O₃)_n.

Entre os compostos mais complexos que podem ser encontrados nas escórias, os mais comuns são:

- *monticelita* – CaO.RO.SiO₂ (onde R é Fe, Mn, Mg).
- *merwinita* – 3CaO.RO.2SiO₂.
- *silicocarnotita* – 5CaO.P₂O₅.SiO₂
- espinélios de composição mista, do tipo da *aluminoferrita cálcica* – 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃.

Em um estudo recente Alanyali (2006) demonstrou a composição química de vários

tipos de escória, segundo pesquisa de vários autores, os valores estão demonstrados na tabela 2.1

Tabela 2.1: Composição química de várias escórias (ALANYALI, 2006).

Tipo de Forno (Autor)	Produtos com Fe (%)	CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	MgO (%)
Alto-Forno (Kawatra, 2002)	<1	30-40	32-40	7-11	<1	12-18
BOF (Kawatra, 2002)	10-35	40-50	10-20	1-7	4-9	5-15
BOF (Murphy, 1997)	25	35	18	3,5	6,5	11,5
BOF (Monshi, 1999)	21	56	10	2	2,5	2
BOF (Motz, 2001)	14-20	42-55	12-18	<3	<5	3-8
BOF (Shen, 1999)	5-20	45-52	13-16	1-1,7	4-7	4-5
BOF (Altun, 2002)	11-14	37-38	18-19	2,5-3	7,5-8	14
BOF (Topkaya, 2004)	25-30	31-35	17-22	2,5-4,5	5-8	7,5-9
BOF (Xuequan, 1999)	8,5	48	12	2,5	-	6
EAF (Luxaan, 2000)	27-34	24-29	6-15	12-14	5-15	3
EAF (Tufekci, 1997)	21-34	1-4	40-57	2-3,5	-	<0,5
EAF (Kawatra, 2002)	10-30	35-60	15-20	3-10	<10	5-15
EAF (Motz, 2001)	18-28	30-40	10-17	4-7	<6	4-15
Forno-Panela (Shi, 2002)	1,5	57	27	5	1	3
Forno-Panela (Kawatra, 2002)	0-10	40-60	3-15	20-40	0-10	5-15

Em escórias de alto cromo, espinélio crômico de composição variada $(\text{FeO})_n \cdot (\text{Cr}_2\text{O}_3)_m$, pode estar presente. Itoh (2000) demonstrou que o MgO reage com o Cr_2O_3 para formar o composto intermediário $\text{MgO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$. A influência da escória na produção de ligas metálicas contendo cromo foi investigada por Jansson, (2002), ele concluiu que, de acordo com a dissolução do minério na escória fundida, esta altera a sua composição e a taxa de redução do mesmo minério, o que acarreta ainda em alterações nas características físicas e químicas da escória, como a viscosidade e, por exemplo, porcentagens de cromo metálico (Cr^0), óxido (Cr_yO_x) e iônico ($\text{Cr}^{+3;+6}$).

Em escórias de alto magnésio, inclusão de cristais de periclásio, MgO, podem estar presentes no estado sólido. Em escórias altamente básicas, inclusões sólidas de CaO também podem ser encontradas. (KUDRIN, 1985).

Três dos principais métodos de identificação da estrutura e dos constituintes das escórias são: a microscopia ótica e eletrônica, a análise por microsonda e difração de raios-x. A maioria das fases primárias pode ser distinguida sob análise microscópica, mas freqüentemente, como no caso das soluções sólidas, sua composição não pode ser imediatamente verificada. A difração de raios-x pode ajudar a confirmar a identificação ótica.

Outra ferramenta poderosa é a microsonda eletrônica. Análises químicas como a digestão e posterior análise por absorção atômica também é utilizada quando se tem o intuito de se quantificar a presença de elementos químicos como por exemplo ferro, cromo total e níquel.

Quando nos referimos ao potencial de contaminação das escórias Geiseler J. (1996), Proctor D. M. (2000) e Motz H. (2001) afirmam que exceto pela variação do pH e da condutividade elétrica do lixiviado, os quais são afetados pela solubilização do cal livre, a extração de outros elementos, mesmo metais pesados, é insignificante em relação ao impacto ambiental. E segundo eles isso se aplica inclusive ao cromo, o qual pode ocorrer em altas concentrações em algumas escórias, mas a concentração no lixiviado é bastante baixa pelo fato dos íons de cromo estarem ligados internamente a fases cristalinas estáveis, como em minérios de depósitos naturais. Shen (2004) concorda com os autores citados, e ainda demonstra que quando dissolvido em ácido clorídrico um molar (HCl 1 M) a escória pode ter até aproximadamente 30% de sua massa dissolvida, liberando em maior quantidade óxidos de Ca e Mg (CaO e periclásio) e alguns silicatos de Ca-Mg. De acordo com o autor, é válido referir o fato de que consideráveis quantidades de Mn e Ni são também dissolvidas com a ação ácida, porém a dissolução de Si, Al, Fe, e Cr não demonstram variação perceptível se comparada com a lixiviação com água.

Proctor (2000) ainda afirma que cromo hexavalente foi detectado em apenas 29% das amostras que estudou, sendo que somente quando a escória é oriunda do processo por arco elétrico e, mesmo assim, constatou que a presença do cromo hexavalente não é considerada prejudicial à saúde de acordo com os padrões americanos da US-EPA tanto para exposições orais e inalação quanto para sítios residenciais. De acordo com o autor o potencial dos metais presentes na escória serem carregados para o meio ambiente é menor que quando comparado com solo. Em um estudo da atuação do clima sobre a escória de aço inox Pillay (2003) demonstra que 0,1 a 1% do cromo presente na escória pode se oxidar ao estado hexavalente num período dentre 6 e 9 meses quando em contato com a atmosfera, comportamento que cessa, segundo ele, após um período de 12 meses.

2.1.2 Escória de aço inoxidável em forno de arco elétrico, e suas características.

Basicamente existem três processos de produção de aço, caracterizados pelo emprego de diferentes fornos de refino: o Siemens-Martin, o conversor a oxigênio (BOF) e o forno de arco elétrico (EAF).

O processo de produção do aço em forno elétrico (EAF) consiste numa fusão de sucata, por um arco elétrico, formado por eletrodos de grafita ou carvão amorfo. Um exemplo da geração da escória de aço inoxidável em aciaria elétrica pode ser observado no esquema da figura 2.3.

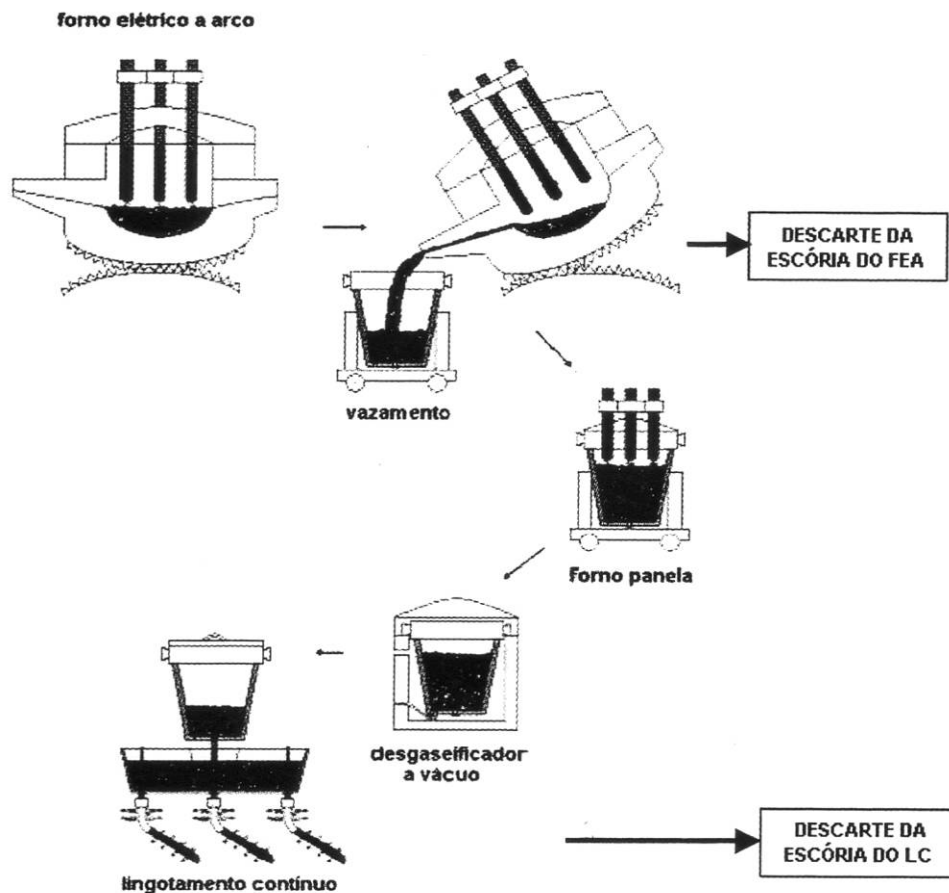


Figura 2.3: Esquema da produção de aço inoxidável por forno de arco elétrico (ZETTERMANN, 2001)

Após a fusão da carga no forno elétrico a arco (EAF), onde é feito o primeiro ajuste de composição química, o aço e escória são vazados para a panela e encaminhados para uma baía, onde a escória é vazada. Neste trajeto até o local de descarte, agentes redutores adicionados provocam a redução de parte do teor de óxido de cromo da escória. Realizado o descarte, novamente são feitas adições para promover a formação de uma nova escória, já que

o aço líquido deve estar sempre protegido por uma camada de escória.

Quando o aço é vazado para o forno panela, uma amostra da escória é coletada para a análise química. Após ajuste de temperatura e da composição química final do aço, a panela é encaminhada para o degaseificador a vácuo. Nesta etapa do processo ocorre a remoção dos gases, especialmente hidrogênio, do aço líquido, a fim de evitar a formação de trincas no produto final, e também é controlado o teor de carbono. Após o tratamento, nova amostra de escória é retirada para análise e a panela é encaminhada para o lingotamento contínuo.

Após o lingotamento a escória da panela é descartada. Deve ser observado o fato de que não há descarte das escórias nas etapas do forno-panela e da degaseificação / descarburização, apenas a remoção de uma pequena amostra para análise química e controle do processo.

Depois de solidificadas, as escórias vazadas são transportadas até o pátio, onde ficam depositadas para o resfriamento. Esse material é então processado, ou seja, britado e separado em fração metálica e não-metálica. A fase metálica, retida durante o vazamento da escória na baia, volta para o processo como sucata, e a fase não metálica, escória, é encaminhada a um depósito coberto. No caso do Rio Grande do Sul, segundo a FEPAM, o cromo presente nestas escórias confere periculosidade ao resíduo e, portanto, todo o material contendo este elemento não pode ser livremente descartado (ZETTERMANN, 2001), concordando com a norma NBR 10004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

As caracterizações da escória de aço inoxidável para a recuperação de metais realizadas por Zettermann (2001) e Shen (2004) indicam a presença, além dos constituintes de escória já citados, de ligas metálicas Fe-Cr-Ni, Fe-Cr e Fe-Ni, entre outros óxidos contendo o cromo, como indicado na difração de raios-X demonstrada na figura 2.4 (e ANEXO A).

De acordo com Shen (2004) os padrões de difração são bem complicados por existirem muitas espécies minerais presentes na escória de aço inoxidável. Os picos das fases de ligas Fe-Cr-Ni e de óxidos Fe-Cr não estão muito claros pois coexistem na posição que os picos representantes da cromita e da magnetita. Porém, após a realização de outros ensaios confirmou a presença de ligas em estado metálico de Fe-Cr-Ni, Fe-Cr, Fe-Ni e ainda de

pequenas partículas de aço inox $\text{Cr}_{0.19}\text{Fe}_{0.7}\text{Ni}_{0.11}$. Corroborando a afirmação de Itoh T. (2000), o qual ainda informa que a liga Fe-Cr líquida está em equilíbrio com o Cr_2O_3 ou $\text{FeO}.\text{Cr}_2\text{O}_3$ dependendo da quantidade de cromo no metal.

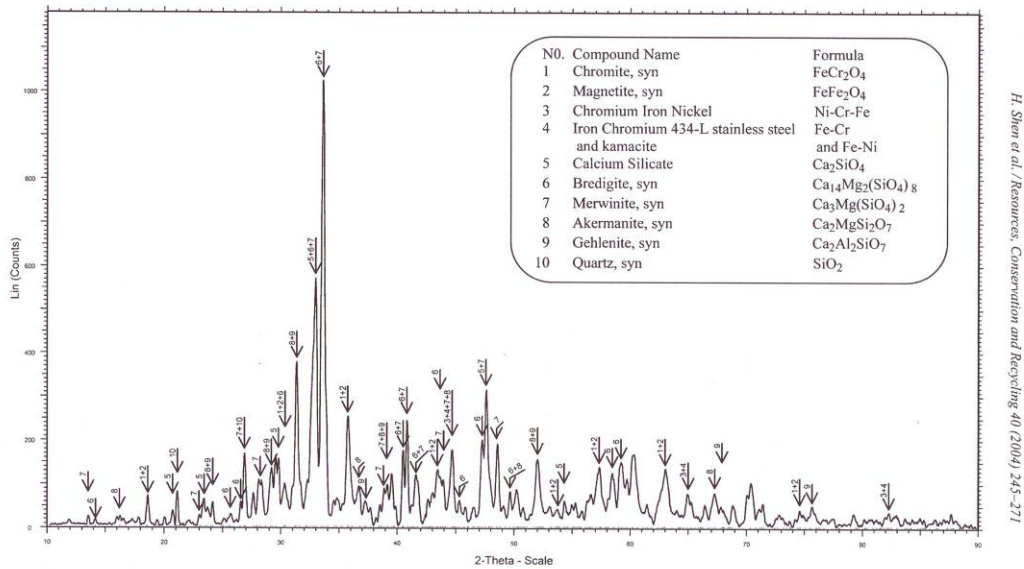


Figura 2.4. Difração de raios-X de escória de aço inoxidável. (Shen, 2004)

Estas partículas metálicas e ainda os óxidos de ferro e cromo se encontram distribuídos na matriz silicatada.

Zettermann (2001) compartilhou da mesma dificuldade, não constatando a presença de ligas metálicas com análises por difração de raios-x, e também explica este fato pela sobreposição dos picos. A difração de raios-x demonstrou a presença das fases relacionadas na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Fases encontradas por difração de raios-x realizada por Zettermann (2001)

Fase	Fórmula
Larnita	Ca_2SiO_4
Espinélio	MgAl_2O_4
Akermanita	$\text{Ca}_2\text{MgSiO}_7$
Cálcio Magnésio	$\text{Ca}_5\text{MgAl}_8\text{SiO}_{21}$
Óxido de cálcio e alumínio	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$
Silicato de cálcio	CaSiO_3
Melilita	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{MgSi}_3\text{O}_{14}$
Periclásio (fase detectada com reservas)	MgO
Magnésiocromita	MgCr_2O_4
Forsterita	$(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$
Silicato dicálcico	Ca_2SiO_4

Em relação à cristalização da matriz da escória, esta pode alterar-se de cristalina a amorfa dependendo das condições de resfriamento, um resfriamento brusco e descontrolado confere um caráter amorfo à escória, sendo esta constituída por uma matriz mais homogênea, porém um resfriamento controlado pode conferir um caráter cristalino, o qual confere a matriz características heterogenias e fases poligonais mais desenvolvidas. Porém mesmo com o controle, pode se encontrar algum amorfismo na escória. A composição química parece não ser o fator preponderante na cristalização do material. O resfriamento é o principal responsável pela estrutura morfológica do material, influenciando mais nas suas características do que a maior ou menos concentração de seus elementos químicos principais.

De acordo com Zettermann (2001) uma fase importante e de difícil identificação por difração de raios-x é o óxido de cálcio livre (CaO), devido a pequena quantidade presente, uma vez que a difração de raios-x dificilmente detecta substâncias cujo teor seja muito reduzido (menor que cerca de 5%). Todas as fases presentes em quantidades pequenas não são passíveis de identificação, o que confere a necessidade de análises químicas (destrutivas) para a avaliação dos teores de metais de baixa concentração na escória, como o Ni por exemplo.

Em um estudo de concentração gravimétrica de escória de aço inox, Silva (2002) observou pontualmente as incrustações metálicas, claramente percebidas nas imagens, da figura 2.5, obtidas por microscopia eletrônica de varredura.

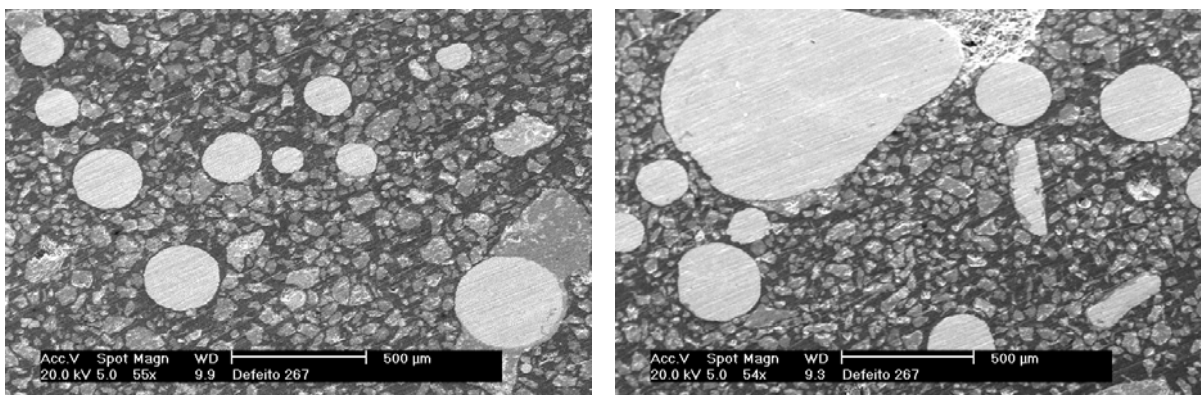


Figura 2.5: Partículas metálicas presentes na escória de aço inox (SILVA, 2002).

A figura 2.6 por sua vez demonstra a presença de duas partículas metálicas encapsuladas pela matriz da escória.

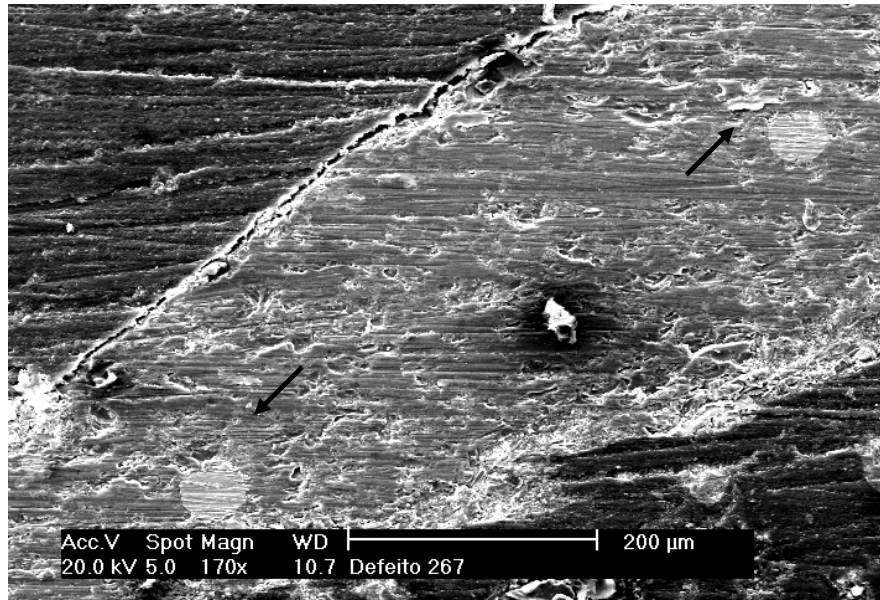


Figura 2.6: Partículas metálicas na matriz de escória MEV (SILVA, 2002).

Através de análises de microsonda realizadas de forma pontual sobre partículas metálicas, demonstradas nos gráficos da figura 2.7, se pode observar a constituição das mesmas.

Os dados de constituição das partículas metálicas analisadas, através de microsonda, estão relacionados na tabela 2.3.

Tabela 2.3: Microsonda pontual de duas partículas metálicas distintas.

Elemento	Porcentagem Mássica (%)	
	Fig 2.7 (Silva 2002)	Fig 2.8 (Silva 2002)
Mg	1,36	12,46
Al	1,31	8,21
Si	1,12	1,78
Ca	1,42	1,76
Cr	28,60	48,03
Mn	0,56	7,81
Fe	53,40	1,31

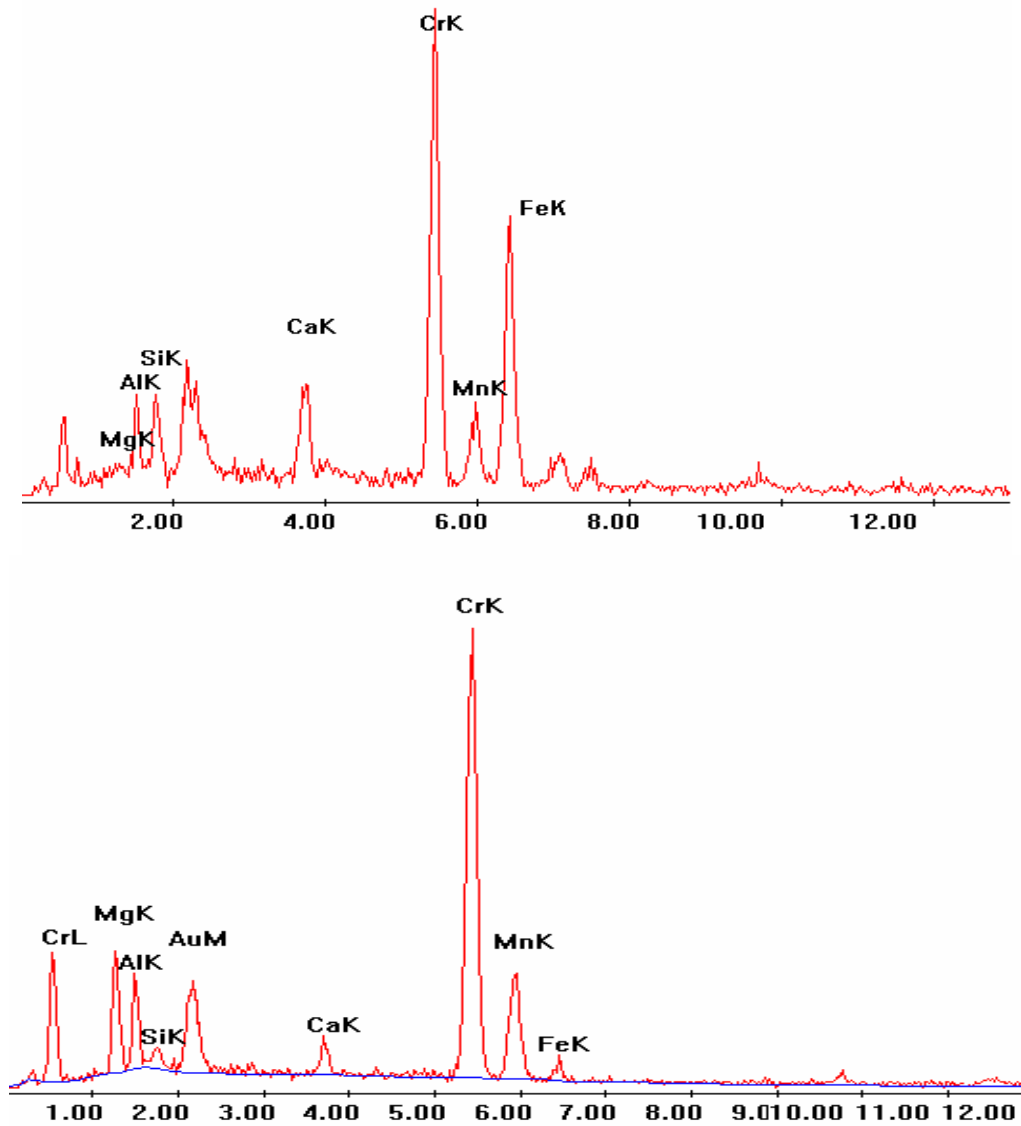


Figura 2.7: Microsonda pontual de duas partículas metálicas distintas (SILVA, 2002).

A caracterização da escória, proveniente da fabricação do aço inox, realizada por Vilela (2000) nos traz algumas considerações. Na figura 2.8 pode-se observar a característica cristalina da escória: a matriz de silicatos e carbonatos (1), as inclusões de cristais de óxidos de cromo (2) e ainda as inclusões metálicas de ligas de ferro e cromo (3).

Podem ser observadas, nas figuras 2.8 (região 2) e 2.9 (região 1), as fases poligonais, as quais são descritas como cristais de Cr_2O_3 precipitados, formados durante o resfriamento, que pode ocorrer também na amostra amorfa, porém em dimensões reduzidas.

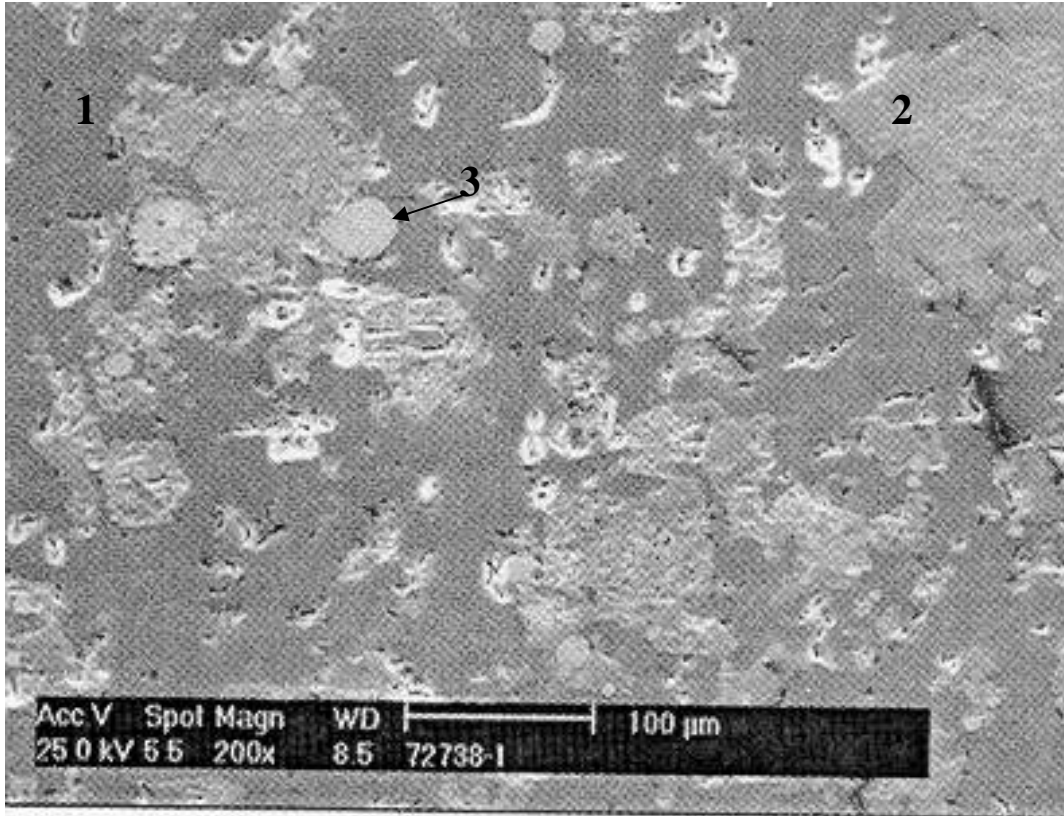


Figura 2.8: MEV Escória de aço inoxidável aumento 200x (VILELA, 2000).

Os pontos claros circulares são partículas metálicas. Percebe-se que o metal retido fica junto às fases poligonais, quando concentrado em maiores quantidades. Quando finamente disperso se encontra na matriz da escória. O aspecto das partículas poderia sugerir a ocorrência de interação entre as fases, provocando o aparecimento de um sub-óxido de cromo com posterior redução a cromo metálico.

Alguns estudos demonstram que a redução do óxido de cromo só inicia a partir do momento em que certa quantidade de FeO tenha sido reduzido para a forma de ferro-carbono metálico, e ocorre na interface escória/metal. A partir disto, pode-se deduzir o fenômeno inverso, ou seja, que a oxidação do cromo acontece na mesma interface, e antes da oxidação do ferro metálico. Provavelmente, esta é a razão de se encontrar a fase metálica sempre junto às regiões ricas em óxido de cromo (VILELA, 2000; ZETTERMANN, 2001)

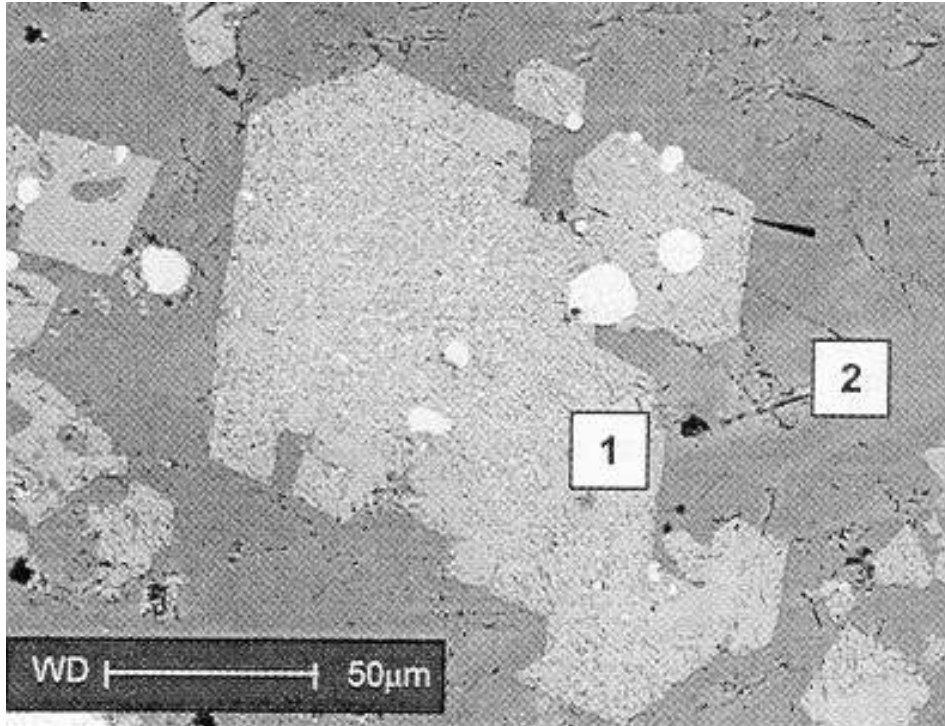


Figura 2.9: Microscopia da Escória, aumento 500 vezes (VILELA, 2000).

Realizando uma comparação em termos de constituição de escórias de aço inox foram cruzados os dados obtidos por Shen, (2004) e Vilela, (2000) em seus estudos estruturais, mineralógicos e dos constituintes químicos de escórias de aço inox. Na tabela 2.4 podem ser comparados percentuais de componentes químicos relativos a um estudo realizado com escórias provenientes da Suécia (SHEN, 2004) e do Rio Grande do Sul - Brasil (VILELA, 2000), os valores estão expressos em porcentagem mássica e demonstram uma diferença significativa para os dados do constituinte de interesse econômico, por exemplo, para o ferro (FeO) e para o cromo (Cr_2O_3). Demonstrando o comportamento heterogêneo da formação da escória de aço inox.

Tabela 2.4: Constituintes Químicos (% mássica).

Componente	Suécia - EAF	Brasil-RS - EAF
CaO	46,90	37,10
SiO ₂	33,50	22,00
MgO	6,22	8,91
Al ₂ O ₃	2,30	7,54
FeO	1,07	9,43
MnO	2,60	3,13
Cr ₂ O ₃	2,92	8,59
V ₂ O ₅	1,28	0,13
TiO ₂	0,16	0,41
P ₂ O ₅	0,02	0,08

Geiseler (1996), Murphy (1997) e Vilela (2000) demonstraram em seus estudos, com auxílio da caracterização mineralógica da escória, a possibilidade da utilização deste material no aprimoramento de propriedades físicas para materiais de construção civil. Algumas aplicações mencionadas são a elaboração de tijolos, o fornecimento de material alternativo para cimentos (excluindo-se para este fim as escórias de aço inoxidável, devido a suas propriedades físicas e químicas), dentre outras. Estes autores concentraram seus trabalhos no estudo de alternativas de disposição final para este resíduo, porém foram abordados poucos detalhes sobre uma possível forma de recuperação dos metais de valor agregado.

2.1.3 Usos e processos de recuperação de escórias.

Em muitos casos, a composição da escória deve possuir certos requisitos especiais dependendo do fim para qual será empregada. A presença de metais valiosos e/ou considerados perigosos para o meio ambiente, características físicas de resistência e durabilidade para o emprego em construção civil, presença de constituintes com potencial fertilizante, são alguns exemplos.

Durante o processo de resfriamento de uma escória de alto forno, ocorre a liberação de alguns elementos como nitrogênio, carbono, hidrogênio e enxofre acarretando na formação de uma estrutura de alta porosidade. A escória de alto forno vem sendo empregadas há muitos anos na construção civil, de acordo com pesquisadores como Geiseler (1996), Proctor (2000), Vilela (2000), Shen (2003), entre outros, é utilizada na fabricação de cimento, construção de rodovias e construção civil, fertilizantes, aterros, dentre outras aplicações.

Na construção civil, como aditivo para a fabricação de cimento, a escória de alto forno pode ser empregada em até 70% da constituição do cimento de escória. O concreto produzido com este cimento possui características físicas e químicas bastante boas, possuindo alta resistência à difusão de álcalis e cloretos, e tem como principal vantagem a emissão de 50% menos CO₂ na sua produção (MURPHY, 1997).

As escórias cal-fosfato, por exemplo, são utilizadas desde 1880 como fertilizante para a agricultura sob o nome de “Fosfato Thomas” devido a sua procedência do processo Thomas de fabricação de aço (GEISELER, 1996). Este fosfato não é solúvel em água, e somente é

transformado em um nutriente vegetal pelos processos de reação de conversão que ocorrem no solo com o suporte da ação bacteriana. O valor do nutriente fosfato se torna acessível em virtude de que uma porção do ácido fosfórico é solúvel em ácido cítrico. O ácido fosfórico de baixa solubilidade é quimicamente ligado como apatita de óxido de ferro, a precipitação da qual pode ser prevenida pela aplicação de fatores de siliconização suficientemente altos, ou pela adição de areia na escória da panela (SLAG ATLAS, 1995).

Em oposição às escórias de alto forno, a utilização de escórias de BOF ou EAF se torna mais complexa. Segundo Geiseler (1996), Proctor (2000) e Shi (2002) dentre outros, a presença de cal livre e MgO confere às escórias de aciarias a propriedade de expansão, pois quando exposta ao meio ambiente estes compostos se hidratam, formando hidróxidos, aumentando de volume. Este comportamento é maléfico para a construção civil. Ainda de acordo com Motz e Geiseler (2001) a estabilidade volumétrica da escória é a chave para o emprego da mesma na construção civil. Outros aspectos que os autores citam são:

- alta densidade;
- forma;
- resistência à fragmentação;
- força;
- absorção de água;
- resistência ao congelamento e ao degelo; e,
- resistência à abrasão e polimento.

A alta densidade das escórias de aço qualifica as mesmas para o emprego com propósitos de engenharia hidráulica, de acordo com Motz e Geiseler (2001) na Alemanha mais de quatrocentas mil toneladas de escória, sem a presença de cromo ou outros constituintes contaminantes, são utilizadas como agregados para a estabilização de leitos de rios contra a erosão. A força por sua vez, descrita pela resistência ao impacto e ao esmagamento, em adição a superfície rugosa são características que levaram a escória de aciaria a ser empregada nas camadas trafegáveis em estradas de tráfego intenso (MURPHY, 1997; MOTZ e GEISELER, 2001).

Shen (2004) demonstra em seu trabalho de caracterização de escória de aço inox que com a utilização de separação magnética e/ou gravimétrica é possível uma concentração de cromo e níquel da escória. Seria necessária uma melhor cominuição das partículas complexas para a liberação de ligas metálicas e óxidos tendo-se o objetivo de um concentrado de alto teor, mas ressalta que as partículas muito finas são de difícil concentração tanto para processos gravimétricos quanto magnéticos tornando a tentativa de recuperação ineficiente. Também observou que algum cromo pode existir em silicatos e este cromo é, de acordo com o autor, impossível de se recuperar por separação mecânica.

Trabalhos como o de Wilson (2006), o qual pesquisou uma nova forma para cominuir a escória liberando assim as frações metálicas e minimizando os custos quando comparado com os moinhos de bolas, reforçam os esforços para a recuperação dos metais presentes neste sub-produto.

Em um trabalho com a aplicação de separações magnéticas de 0,08 e 0,1 Tesla para a recuperação de cromo de escórias provenientes da produção de ferro-cromo, Sripriya (2005) não obteve resultados satisfatórios. Seu estudo foi realizado com amostras granuladas menores que 10 milímetros, e a concentração foi efetuada com a aplicação de 3 concentrações magnéticas, sendo que a primeira para a amostra de escória e as duas seguintes para os resíduos não magnéticos gerados. Como resultado obteve uma recuperação de apenas 2% do total de cromo presente na escória, gerando um concentrado com teor de 36,2% de cromo, não fazendo referência a recuperação mássica da escória num todo.

Alguns estudos para a recuperação do cromo presente na escória de aço inoxidável possuem abordagem pirometalúrgica, segundo Park J. H. (2004) a redução de escórias contendo Cr_2O_3 tem sido estudada tendo-se a composição da escória e a temperatura do processo como principais variáveis para se obter uma melhor recuperação do cromo.

O estudo de Guoyhu Ye (2003) demonstrou uma redução no teor de cromo de 6,7% para 0,02%, tendo como média uma recuperação de mais de 90% do cromo e aproximadamente 100% do níquel, com a utilização de um forno DC de 3MW com eletrodo oco para o tratamento de redução dos metais presentes na escória fina, gerando como produto final um aço inox de teor de 1-20% de cromo e 4-5% de níquel. Ainda realizou testes para a utilização

da escória resultante da redução para a elaboração de cimento e agregado hidráulico com sucesso.

Nakasuga (2004) conclui que a recuperação do cromo por redução da escória no processo de produção de aço é relativamente lenta, sendo que aumenta em velocidade com o aumento da temperatura e controle da presença de Al_2O_3 e SiO_2 os quais alteram a viscosidade da escória e o ponto de fusão da mesma. Park (2004) em um trabalho semelhante, onde realizou a redução de escória de aço inox utilizando alumínio a 1793 K, cita o fato de o cromo não reduzir até a formação de ferro líquido em face das reações de redução dos óxidos de cromo ocorrerem na interface escória/aço líquido. Em seu trabalho obteve a redução de 80% de Cr_2O_3 .

Em nenhum destes trabalhos foi informada a relação de custos dos processos, porém de acordo com Sripriya (2005) a aplicação de processos pirometalúrgicos é mais onerosa do que os processos gravimétricos ou magnéticos para a concentração dos metais. Topkaya (2004) ainda afirma que mesmo que sejam utilizadas metodologias para a redução dos óxidos, estes devem ser previamente concentrados para a otimização do processo.

2.2 Separação Magnética:

A separação magnética é um método consagrado na área de processamento de minérios para a concentração e/ou purificação de muitas substâncias minerais. Pode ser empregada, dependendo das diferentes respostas ao campo magnético associadas às espécies mineralógicas individualmente, no beneficiamento de minério e na remoção de sucata (Luz, 2004).

Este procedimento é reconhecido, desde o início do último século, como um método de concentração de minerais. Desenvolvimentos constantes de novas tecnologias apresentando melhoras significativas nos rendimentos têm sido realizados, e hoje em dia pode-se dizer que a separação de partículas magnéticas apresenta alta seletividade. Mesmo com todo o progresso, a maioria dos separadores magnéticos comerciais utiliza apenas a tecnologia básica de remover o material magnético, não sendo capaz de realizar nenhuma discriminação dentre os mesmos, para classificá-los, obtendo-se normalmente três produtos clássicos: magnéticos,

mistos e não magnéticos (AUGUSTO, 2002).

A propriedade de um material que determina a sua resposta a um campo magnético é chamada de susceptibilidade magnética. Com base nessa propriedade os materiais ou minerais são classificados em duas categorias: aqueles que são atraídos pelo campo magnético e os que são repelidos por ele. No primeiro caso tem-se os minerais ferromagnéticos, os quais são atraídos fortemente pelo campo, e os paramagnéticos, que são atraídos fracamente. Aqueles que são repelidos pelo campo denominam-se de diamagnéticos (LUZ, 2004).

Hoje em dia devem ser levados em consideração muitos aspectos para se adotar um separador magnético. Devido ao alto valor do equipamento é imprescindível que seja conhecido o comportamento magnético do material, e assim, o rendimento do equipamento perante o material a ser beneficiado. Tal fato torna a classificação magnética do material uma etapa importante no beneficiamento magnético, tanto como na escolha de qual equipamento utilizar.

A classificação magnética é definida teoricamente como a habilidade de classificar partículas magnéticas pela suscetibilidade magnética, em outras palavras, classifica as partículas como pouco magnéticas, magnéticas, ou muito magnéticas. Realizada a classificação magnética, os resultados poderão ser expressos em quantidade (porcentagem) de massa por suscetibilidade magnética, sendo assim torna-se conhecido o rendimento que o equipamento escolhido pode fornecer (AUGUSTO, 2002).

2.3 Princípios da separação por Força Magnética

Sob o ponto de vista físico, átomos podem ser considerados ímãs. Os elétrons têm um movimento de rotação próprio (spin) e também giram em torno do núcleo, formando pequenos dipolos magnéticos temporais. Diferentes materiais podem apresentar comportamentos magnéticos diferentes devido ao modo de interação desses dipolos elementares com o campo magnético e com os dipolos vizinhos. Ferromagnetismo, paramagnetismo e diamagnetismo são os comportamentos magnéticos, mais usuais, que os materiais podem apresentar (SVOBODA, 2003).

Minerais ou materiais ferromagnéticos correspondem aqueles que são fortemente atraídos pelo imã comum. O exemplo mais conhecido é a magnetita. Os paramagnéticos são fracamente atraídos e o exemplo clássico é a hematita. Os minerais diamagnéticos possuem susceptibilidade magnética negativa e, portanto, são repelidos quando submetidos a um campo magnético, entre outros destacam-se: quartzo, magnesita, fluorita, etc. (LUZ 2004).

2.3.1 Ferromagnetismo

Nos materiais ferromagnéticos os dipolos elementares são permanentes e, aparentemente, se alinham na direção de um campo magnético aplicado, resultando elevados níveis de magnetização.

De maneira resumida, pode-se dizer que os dipolos formam regiões distintas chamadas domínios. Em cada domínio, os dipolos têm o mesmo alinhamento. Entretanto, os alinhamentos dos domínios podem estar distribuídos aleatoriamente, resultando magnetização nula.

Sob ação de um campo magnético, os domínios de alinhamentos próximos aos do campo tendem a aumentar, com o sacrifício dos de alinhamentos distantes. Nestes últimos ocorre também a tendência de mudança dos alinhamentos para direções mais próximas da do campo aplicado. Tudo isso produz uma considerável magnetização.

Quando o campo elétrico é removido, os domínios alterados tendem a se fixar, produzindo ímãs permanentes.

A variação positiva do campo aplicado produz curva de magnetização diferente da variação negativa. Isto é chamado de histerese.

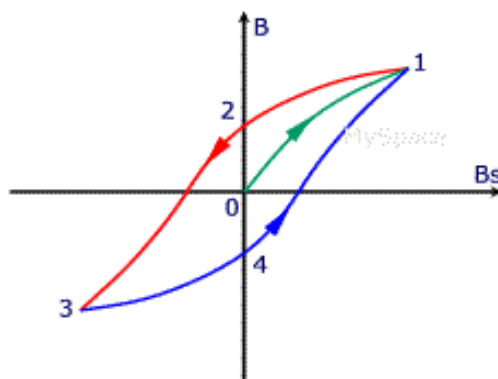


Figura 2.10: Histerese

No gráfico da Figura 2.10, B_s é o campo aplicado, produzido por um solenóide pelo qual passa uma corrente variável. E B é o campo no material. Consideramos que o material, inicialmente, não está magnetizado. A corrente aplicada varia de zero até o valor correspondente ao ponto 1, resultando a curva 0-1. Reduzindo a corrente a zero, a variação segue a curva 1-2. Invertendo o sentido da corrente até um valor oposto ao do ponto 1, a curva é 2-3. E a curva 3-4-1 é o retorno à condição do ponto 1. Nota-se que nos pontos 2 e 4 a corrente é nula mas a magnetização não. Isso significa que foram formados magnetos permanentes (HALLIDAY, 2003).

O ferromagnetismo ocorre nos elementos ferro, cobalto, níquel, gadolínio, disprósio e em ligas desses e de outros elementos (HALLIDAY, 2003).

2.3.2 Paramagnetismo

Nos materiais paramagnéticos os dipolos elementares são permanentes e, na presença de um campo magnético, tendem a se alinhar com o mesmo, mas o alinhamento perfeito é impedido pelo movimento térmico.

A magnetização do material varia linearmente com o campo magnético aplicado e a temperatura.

Sob ação de um campo magnético forte, um material paramagnético se torna um ímã, mas a magnetização desaparece com a remoção do campo. (HALLIDAY, 2003)

2.3.3 Diamagnetismo

Nos materiais diamagnéticos os dipolos elementares não são permanentes. Se um campo magnético é aplicado, os elétrons formam dipolos opostos ao campo atuante. Assim, o material sofre uma repulsão. Mas é um efeito muito fraco.

Na realidade, todas as substâncias apresentam algum grau de diamagnetismo, mas o fenômeno é tão fraco que é mascarado pela ação dos dipolos permanentes naqueles que os têm (paramagnéticos e ferromagnéticos).

Por sofrerem repulsão, a suscetibilidade magnética desses materiais é negativa, com valores bastante baixos (HALLIDAY, 2003).

2.4 Grandezas magnéticas

Descrevendo-se um campo magnético, normalmente tem-se duas grandezas; densidade de fluxo magnético \vec{B} , e intensidade de campo, \vec{H} . A primeira, \vec{B} , tem relação como número de linhas de indução que passam através da partícula mineral. A segunda, \vec{H} , é a força de magnetização que induz a passagem das linhas de indução através da partícula.

Sendo que:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{eq 1}$$

μ = permeabilidade magnética do meio.

No vácuo, μ pode ser igual a μ_0 para fins práticos. Nas situações onde \vec{B} e \vec{H} diferem somente pelo fator de proporcionalidade, μ , indistintamente podem ser chamados de campo magnético.

A experiência mostra que quando se coloca uma partícula mineral fracamente magnética em determinado campo \vec{H} de uma dada região do espaço, o fluxo magnético \vec{B} é

acrescido da indução magnética do material ($\vec{\Psi}$) tal que:

$$\vec{B} = \vec{H} + \vec{\Psi} \quad \text{eq 2}$$

Sendo o seu valor no ar muito pequeno, pode-se tomar o valor de \vec{B} igual a \vec{H} . É muito comum referir-se apenas à magnetização \vec{J} de um material, que é a ação de criar linhas de indução magnética ou um campo magnético em uma substância ou em uma região determinada do espaço. A relação entre a indução magnética e magnetização é dada por:

$$\vec{\Psi} = 4\mu \vec{J} \quad \text{eq 3}$$

Conclui-se que a equação 2 pode ser escrita da forma:

$$\vec{B} = \vec{H} + 4\mu \vec{J} \quad \text{eq 4}$$

A razão adimensional entre \vec{J} , magnetização e \vec{H} , intensidade de campo, é chamada de susceptibilidade magnética k , ou seja:

$$k = \vec{J} / \vec{H} \quad \text{eq 5}$$

Para materiais paramagnéticos, k é uma constante positiva e de baixo valor, não ultrapassando normalmente a ordem de 10^{-3} . Para os materiais diamagnéticos, k é uma constante negativa, usualmente menor (em módulo) que 10^{-5} . A susceptibilidade magnética de um material ferromagnético é variável dependendo do campo de magnetização, da natureza e manuseio da amostra. (LUZ, 2004; STRADLING, 1993)

2.5 Magnetos e geração do campo magnético

Embora os magnetos permanentes tenham sido usados por várias décadas como geradores de campos magnéticos em separadores, a sua popularidade aumentou ainda mais com a aplicação de ferritas magnéticas de baixo custo. Mais tarde teve-se o surgimento de

uma nova geração de separadores magnéticos, baseados em magnetos permanentes de terras-raras, os quais foram então implementados nos rolos magnéticos. Um pico de 1,9 T, com um alto gradiente, pode ser gerado na superfície deste rolo. Atualmente a utilização de magnetos baseados em ferro tem diminuído devido ao fato do seu campo magnético ser limitado pelo potencial de saturação magnética que o elemento apresenta. Sendo assim muitos separadores magnéticos, cujos solenóides e supercondutores são baseados em magnetos de terras-raras, estão sendo utilizados com mais frequência e com melhores resultados (SVOBODA, 2003).

Utilizando-se magnetos permanentes existem dois métodos fundamentais de geração de um gradiente de um campo magnético. Tais métodos são igualmente importantes para a eficiência da separação magnética: através de um judicioso arranjo dos elementos dos magnetos, e/ou da variação do seu posicionamento, pode-se explorar a variação do campo magnético como uma função relativa à distância entre os elementos geradores do campo magnético (SVOBODA, 2003).

Como já mencionado o campo eletromagnético provém da aplicação de uma quantidade de energia elétrica em um elemento paramagnético ou ferromagnético. Existem as mais variadas formas de se gerar um campo magnético. Uma das formas mais comuns é a aplicação de uma intensidade de corrente em uma bobina de metal, onde o fluxo eletrônico através do metal orienta os seus elétrons em uma só direção gerando o campo magnético com dois pólos definidos.

2.6 Partículas submetidas á ação de campo magnético

No momento em que uma partícula magnetizável é colocada sob a ação de um campo magnético não homogêneo, ela sofre a ação da força magnética dada por

$$\vec{F}_m = \frac{\kappa}{\mu_0} VB \vec{\nabla} B \quad \text{eq 6}$$

sendo κ a suscetibilidade magnética volumétrica da partícula, μ_0 a permeabilidade magnética no vácuo, V o volume da partícula, B o campo magnético externo e $\vec{\nabla} B$ o gradiente do campo magnético. Assim, a força magnética é proporcional ao produto entre o campo magnético

externo e o gradiente do campo e tem como direção a mesma inclinação (gradiente) do campo. Em um campo magnético homogêneo, no qual $\vec{\nabla}B = 0$, a força na partícula também é nula.

Em um separador magnético, ocorre sobre a partícula a atuação de várias forças, que podem somar ou competir entre si. Estas são, entre outras, a força da gravidade, inércia, arraste hidrodinâmico e ainda forças superficiais entre as partículas. Esta situação é demonstrada esquematicamente na Figura 2.11.

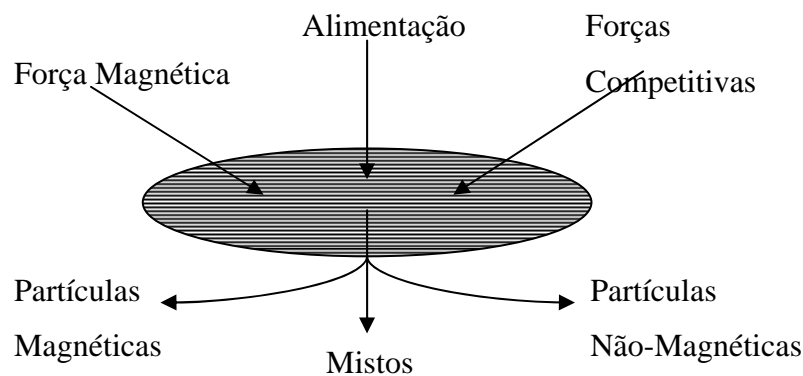


Figura 2.11. Diagrama esquemático do processo de separação magnética.

As partículas magnéticas serão separadas das não-magnéticas (ou partículas mais magnéticas separadas das menos magnéticas), se as seguintes condições sejam alcançadas:

$$F_m^{mag} > \sum F_c^{mag} \text{ e ainda } F_m^{n\tilde{a}o-mag} < \sum F_c^{n\tilde{a}o-mag} \quad \text{eq 7}$$

sendo F_m a força magnética e F_c a força competitiva, enquanto F^{mag} e $F^{n\tilde{a}o-mag}$ são as forças atuantes nas partículas magnéticas e não-magnéticas respectivamente.

No aspecto de beneficiamento, para se obter uma alta taxa de recuperação das partículas magnéticas, a força de separação magnética deverá ser maior que a soma das forças que com ela competem. Entretanto, a seletividade da separação será pobre, devido a não distinção entre várias partículas magnetizáveis. A seletividade deve ser determinada através dos valores relativos das forças magnéticas e competitivas, e estas são diretamente afetadas pela correta escolha do separador e das condições de operação.

No beneficiamento a seco, cujo arraste hidrodinâmico é praticamente nulo, o tamanho da partícula, como regra, não afeta a eficiência da separação significativamente devido ao fato de que partículas do mesmo tamanho (alimentação) sofrem a atuação das mesmas forças (magnética e gravidade) de forma igual (SVOBODA, 2003).

As grandezas magnéticas mais importantes que determinam a força magnética atuando em um sólido podem ser ilustradas revendo uma experiência de magnetismo e analisando o comportamento de algumas partículas submetidas à ação de um campo magnético. Observe a figura 2.12.

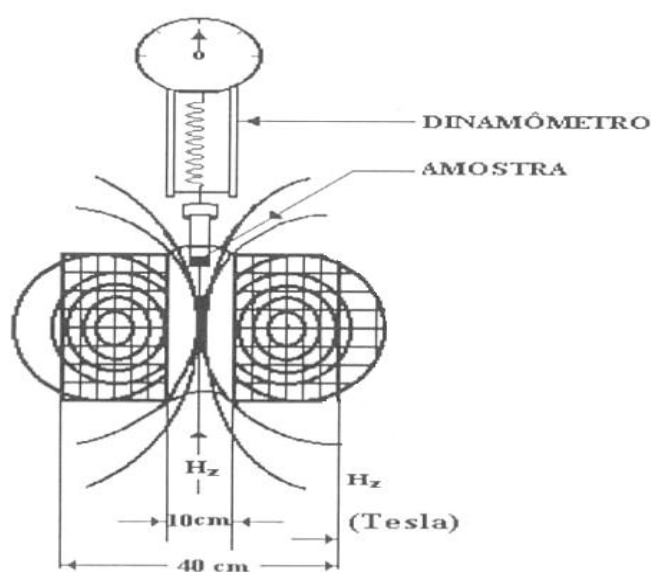


Figura 2.12: Campo magnético no interior de um solenóide (LUZ, 2004).

Tendo o campo magnético, produzido por um solenóide, uma intensidade H_z , de 3 T no centro da espira e de 0,18 T nas extremidades. Se a corrente através do solenóide é reduzida em 10 vezes, o campo magnético em todos os pontos será proporcionalmente reduzido de 10 vezes e o consumo de energia será reduzido 100 vezes. Quando se colocam amostras de quartzo, hematita e magnetita em um determinado ponto ao longo do solenóide observa-se que ao variar a corrente elétrica o campo magnético também varia e como consequência altera-se o peso aparente da partícula. Tomando-se a variação aparente do peso em grama (g) igual à unidade magnética em unidades de grama-força. Verifica-se que a força magnética é mais intensa nas extremidades da espira e não em seu centro, onde existe maior intensidade de campo magnético. Na verdade no centro do solenóide a força é praticamente zero. De tal forma, observa-se que a força é maior onde há maior gradiente de campo e, no centro do

solenóide são nulos gradiente e força magnética.

A Tabela 2.5 demonstra o diferente comportamento de 1,0 g da amostra localizada na borda da espira em relação à força magnética aplicada. O sinal positivo indica a orientação no sentido de maior intensidade de campo e em gramas para facilitar a comparação com o peso da amostra. Nota-se que a força sobre a hematita e o quartzo aumenta com o quadrado do campo ou do gradiente, embora a força sobre a magnetita aumenta na mesma proporção do aumento do campo magnético. Para o quartzo, material tipicamente diamagnético, a força atuante é muito menor que o seu peso. Na hematita, mineral paramagnético, a força é desprezível comparada com seu peso, sob ação de campo de 0,18 T. Apenas com o aumento do campo com intensidade de 1,8 T o valor da força magnética situa-se na ordem de grandeza da força gravitacional. A magnetita, mineral ferromagnético, detém força magnética muitas vezes maior que seu peso, mesmo sob ação de um campo com baixa intensidade.

Tabela 2.5: Demonstrativo da variação da intensidade de força magnética.

Amostra	$H_z = 1,8 \times 10^{-1} \text{ T}$	$H_z = 1,8 \text{ T}$
Quartzo	$-1,54 \times 10^{-4} \text{ g}$	$-1,54 \times 10^{-2} \text{ g}$
Hematita	$6,43 \times 10^{-4} \text{ g}$	$6,43 \times 10^{-1} \text{ g}$
Magnetita	15,8g	158g

O fenômeno que governa a separação magnética está relacionado a duas questões básicas: o comportamento das partículas diferentes quando expostas a um mesmo campo magnético e às forças magnéticas que atuam sobre elas. (LUZ, 2004)

Na situação inicial, tem-se a análise das respostas de diferentes partículas ao campo a elas aplicado. Isso resulta na atração ou repulsão das mesmas pelo campo. A figura 2.13 mostra a indução magnética para diferentes substâncias, em função da intensidade de campo aplicado. Observa-se que a substância ferromagnética (curva “a”) apresenta resposta rápida da indução magnética com o campo. Na curva “b” isso ocorre, porém menos acentuado e linearmente com o aumento do campo, são as paramagnéticas. No caso da curva “c” a situação é inversa, a indução magnética apresenta valor negativo, sofrendo repulsão pelo campo, comportamento observado para substâncias diamagnéticas.

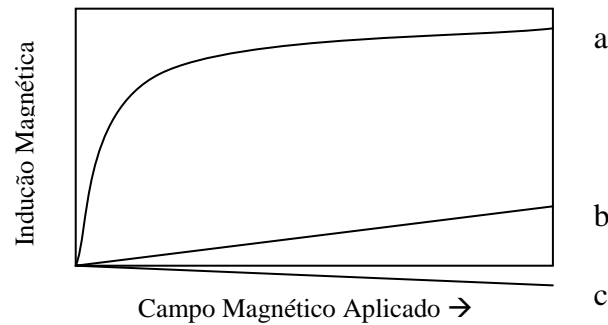


Figura 2.13: Indução Magnética de diferentes Espécies Mineralógicas
(a) ferromagnéticas, (b) paramagnéticas e (c) diamagnéticas

Em segundo lugar, procura-se analisar como as forças magnéticas atuam sobre partículas submetidas a um campo. É útil imaginar que uma partícula magnetizada comporte-se temporariamente como uma barra magnética, em cujas extremidades estão os pólos norte e sul. Nos materiais ferromagnéticos, o alinhamento dos dipolos é permanente. Nos materiais paramagnéticos tal alinhamento não é permanente, sendo apenas induzido quando o campo é aplicado, tornando-se totalmente aleatório com a ausência do campo.

No momento em que um campo magnético uniforme é aplicado a uma partícula, as forças que atuam sobre dois pólos da mesma são iguais e opostas, portanto a resultante dessas forças é nula. Se o campo aplicado nas duas extremidades, difere em intensidade, resultará numa força agindo sobre a partícula. Tal fato mostra que o campo aplicado possui variação especial que é função das dimensões do material magnetizado. Essa variação de campo, também chamada de gradiente, resulta numa força atuante sobre o material, provocando a atração ou repulsão do mesmo. (LUZ, 2004)

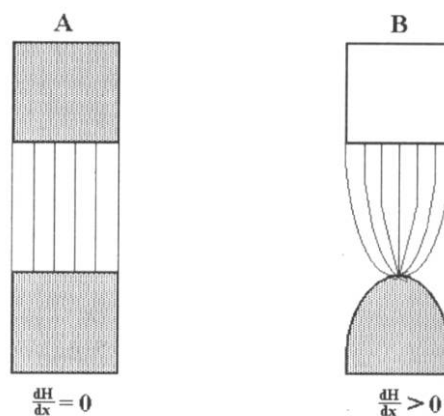


Figura 2.14 – Demonstrativo de campo e gradiente magnéticos (LUZ, 2004)

Nos equipamentos modernos tanto o campo quanto o gradiente são os responsáveis de

primeira ordem pelo processo de separação. Relembrando que a intensidade de campo refere-se ao número de linhas de fluxo que passa por uma determinada área, enquanto que, o gradiente de campo descreve a convergência ou divergência das linhas de fluxo. A figura 2.14 ilustra muito bem esse fato, em “A” tem-se um campo uniforme. A força resultante é nula sobre uma partícula colocada neste campo. Em “B” tem-se um campo convergente, o fluxo de linhas mostra um gradiente de campo, há no caso uma força resultante atuando sobre a partícula. (LUZ, 2004)

2.7 Classificação magnética

A classificação magnética é uma etapa de alta importância para o beneficiamento, pois através desta prática pode-se observar a reação do material ao sofrer a ação de campos magnéticos distintos, progressivamente. As informações fornecidas por uma classificação magnética possibilitam a escolha do equipamento a ser utilizado tendo-se assim o melhor rendimento possível.

O processo pode ser realizado conforme demonstra o estudo de Augusto (2002), onde discos magnéticos rotativos realizam uma separação magnética, porém com várias intensidades de campos magnéticos em seqüência, conforme ilustra a figura 2.15.

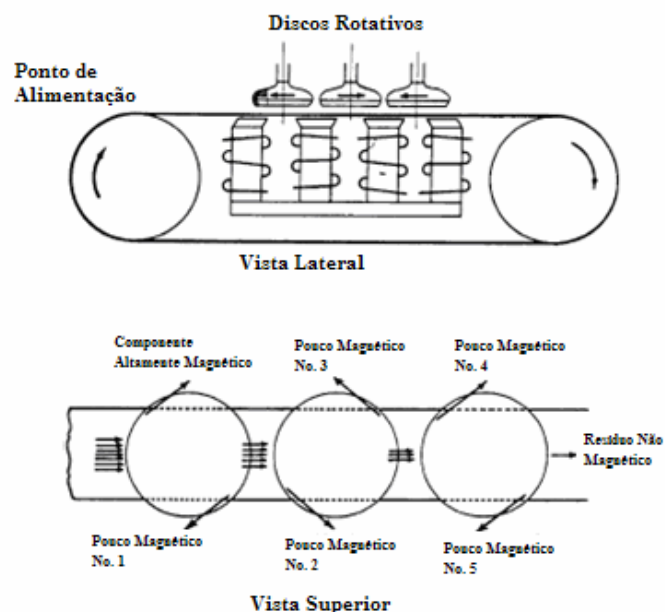


Figura 2.15: Classificador Magnético Variável (AUGUSTO, 2000).

Sendo assim, o equipamento fornece uma separação mássica da amostra relacionada, especificamente, a cada gradiente de campo magnético. Com esses resultados pode-se prever o resultado do beneficiamento com o uso de equipamentos com características de campo magnético conhecido (AUGUSTO, 2002). Existem também equipamentos com a utilização seqüencial de rolos induzidos com diferentes intensidades para a realização deste tipo de caracterização (LUZ, 2004).

2.8 Separadores magnéticos

Na atualidade várias propostas de classificação de separadores magnéticos têm sido introduzidas e, provavelmente, o mais prático e lógico é a classificação dos separadores como secos ou úmidos. Ainda, deve-se salientar que os separadores podem operar com campos magnéticos de alta ou baixa intensidade e/ou gradientes altos ou baixos.

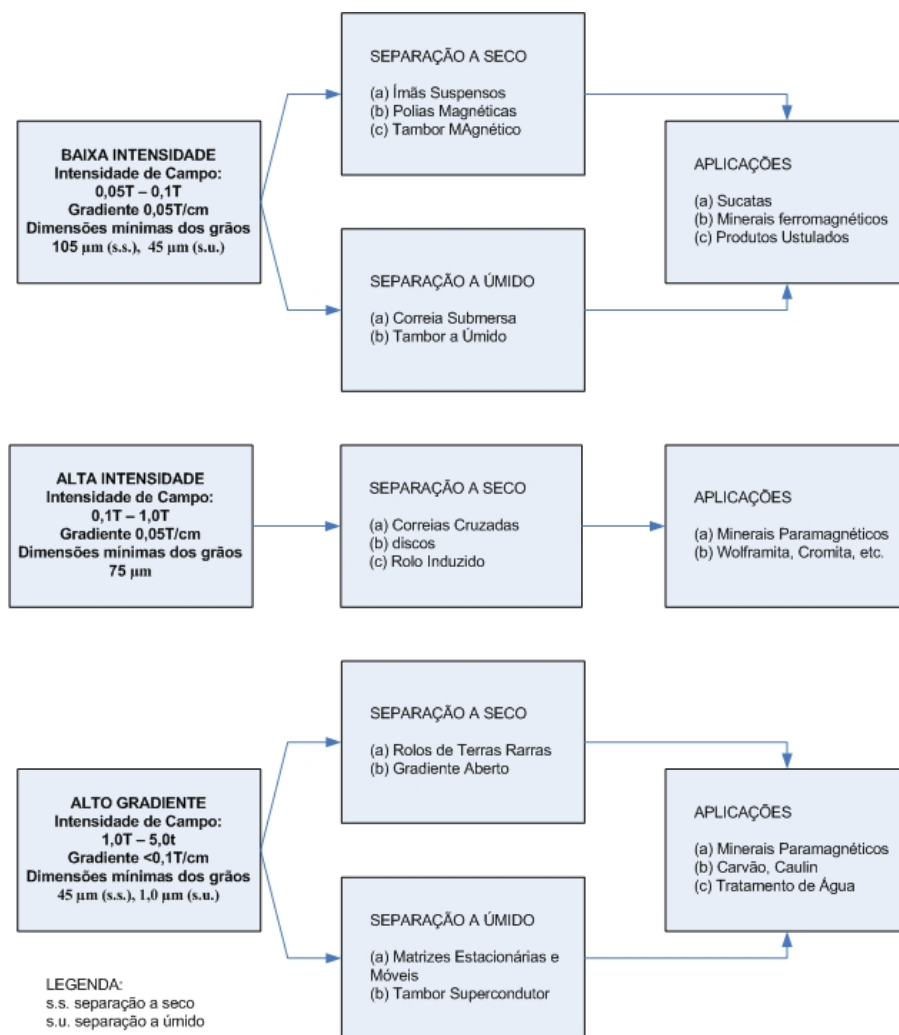


Figura 2.16: Classificação, características e aplicações de alguns separadores magnéticos (LUZ, 2004).

A forma dos elementos que executam o trabalho de separação no equipamento exerce influência significativa sobre a classificação dos separadores. Assim são denominados separadores de tambor, de rolos induzidos, de correias cruzadas, de carrossel etc. A figura 2.16 demonstra a classificação, características e aplicações de alguns separadores magnéticos

A escolha da classe do separador a ser empregado depende de várias considerações, sendo as mais importantes a distribuição granulométrica e a distribuição magnética do produto a ser beneficiado e ainda a capacidade do equipamento (SVOBODA, 2003).

2.8.1 Separador magnético de baixa intensidade a seco

A principal aplicação deste separador magnético é a remoção de sucatas e impurezas altamente magnéticas ou a concentração de metais de alto magnetismo com valor agregado. Magnetos suspensos, de esteiras e placas magnéticas são usualmente utilizados para cumprir tais tarefas como o separador magnético de correia cruzada “*crossbelt*” demonstrado na figura 2.17 (SVOBODA, 2003).



Figura 2.17: Separador magnético Steinert® de correia cruzada (SVOBODA, 2003).

2.8.2 Separador magnético de baixa intensidade a úmido

Conhecidamente, o separador magnético de baixa intensidade a úmido mais utilizado é o de tambores. Estes separadores são utilizados na recuperação de magnetita e ferrosilício, os

quais são utilizados na formação de meios-densos. O princípio de funcionamento destes separadores é baseado em magnetos permanentes, os quais podem ser orientados de forma radial ou axial ao tambor. Na configuração radial, demonstrada na figura 2.18A, a polaridade dos magnetos são alternadas ao longo do eixo do tambor, enquanto na configuração axial, conforme figura 2.18B, os pólos são alternados no decorrer da circunferência do tambor. A configuração radial é normalmente aplicada onde a recuperação de materiais altamente magnéticos é importante, já o sistema axial é utilizado quando se objetiva um alto teor de concentrado. O movimento e a agitação das partículas sobre os magnetos com polaridades alternadas facilita a remoção das partículas não magnéticas incrustadas gerando um aumento no teor do concentrado (SVOBODA, 2003).

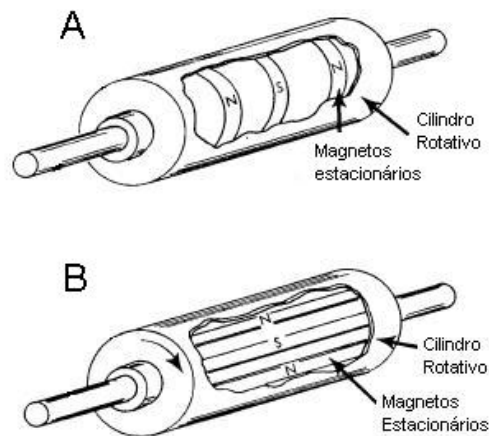


Figura 2.18: Configuração dos Pólos em separadores magnéticos de tambor.

Como exemplo de equipamento disponível no mercado nacional pode-se citar o Separador Magnético de Tambor por via Úmida da IMBRAS[®], demonstrado na Figura 2.19, já no mercado internacional pode-se citar as marcas STEINERT[®], CARPCO[®] dentre outras.

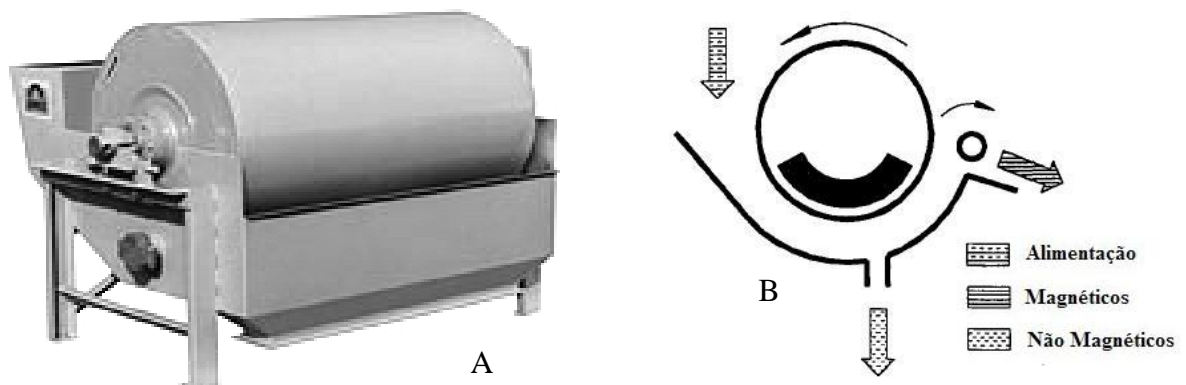


Figura 2.19: Separador Magnético de Tambor via Úmida IMBRAS[®] (A), e gráfico (B).

2.8.3 Separador magnético de alta intensidade a seco

Aplicado em empresas de beneficiamento mineral este separador é utilizado quando há necessidade de se concentrar materiais grosseiros e de baixo potencial magnético. O princípio de funcionamento é similar ao do separador de baixa intensidade, onde uma esteira com o material é impulsionada por rolos. Em uma das extremidades o rolo é o magneto o qual mantém as amostras aderidas a esteira de acordo com o potencial magnético do material a ser separado (SVOBODA, 2003). Um exemplo deste equipamento é o separador de alta intensidade STEINERT[®] utilizado no presente trabalho, porém sob o ponto de vista industrial o equipamento difere em dimensões do utilizado, uma imagem de um equipamento de separação magnética de alta intensidade em escala industrial pode ser observada na figura 2.20.

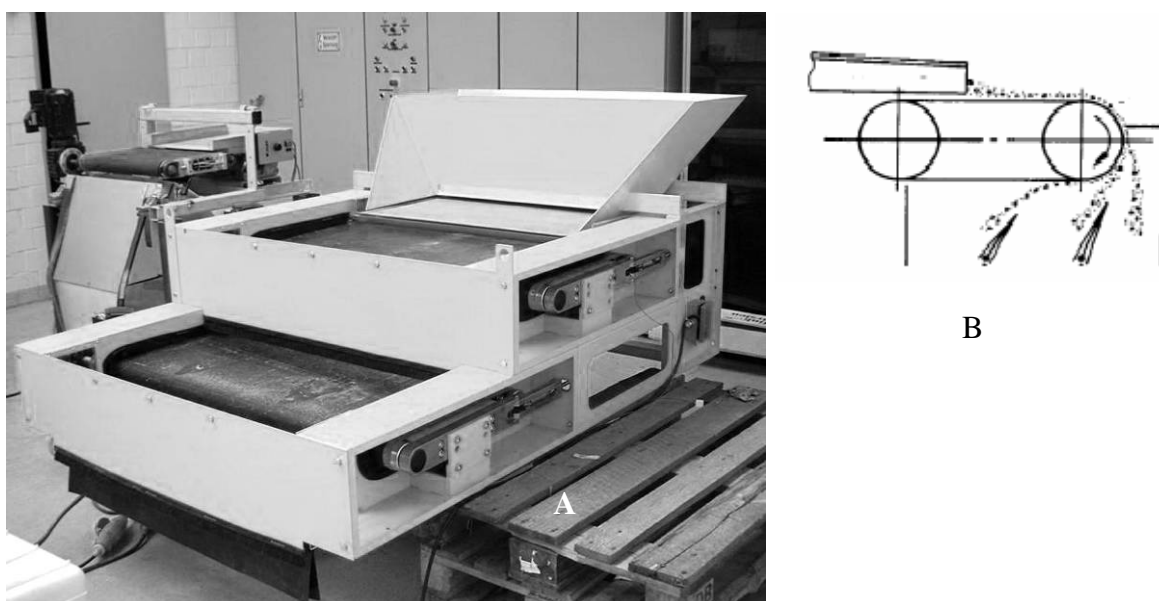


Figura 2.20: Concentrador Magnético de Alta Intensidade STEINERT[®] (A) e gráfico (B).

2.8.4 Separador por Rolo Magnético

A separação por rolo magnético pode possuir magnetos permanentes, ou magnetos induzidos eletricamente (eletromagnéticos). Para os separadores eletromagnéticos a fração magnética é separada durante a passagem do minério através de campos magnéticos com intensidades ajustáveis, produzidos por rotores localizados entre os pólos de eletroímãs. O “vão” entre o pólo e o rotor pode ser ajustado para qualquer posição, sendo usual trabalhar com abertura bem menor, comparada de outros separadores. Como o fluxo magnético é uma

função inversa do quadrado do “vão”, as forças de campo mais intensas são obtidas com o “vão” menor, e, conseqüentemente, uma alimentação com granulometria mais fina. A convergência de campo é reforçada, em alguns modelos, pela utilização de rotores dotados de sulco na superfície (LUZ, 2004).

As partículas são alimentadas sobre o rotor e penetram imediatamente na região de campo entre o pólo e o rotor. Tal fato confere às partículas magnéticas trajetórias diferentes das não magnéticas, sendo coletadas separadamente conforme se observa na Figura 2.21.

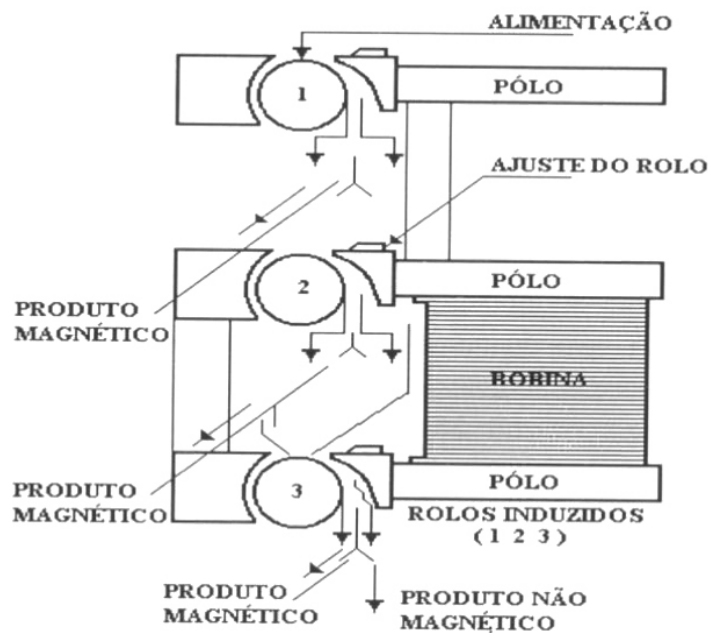


Figura 2.21: separador magnético de rolo induzido (LUZ, 2004).

Os separadores de rolo induzido são usados na remoção das impurezas ferruginosas presentes nos concentrados de sílica (areia), feldspato, barita, etc. Como etapas de concentração, são usados nos circuitos de beneficiamento de minerais paramagnéticos tais como: monazita, cromita, granada, wolfranita, etc. Como pode ser visto, o processo é realizado de forma que o material não magnético de uma etapa sofra nova separação.

Os equipamentos são fabricados desde o modelo mais simples com um rolo, até os modelos mais sofisticados com rolos em série. A capacidade de alimentação varia de caso a caso. No entanto, a faixa de operação situa-se entre 17.700 a 35.400 kg/h.m de largura do rolo.

Os equipamentos de magnetos permanentes, por sua vez, possuem o princípio de funcionamento similar aos rolos magnéticos a úmido, mas com a não utilização de um meio líquido, a alimentação se faz semelhante aos rolos eletromagnéticos, a amostra é alimentada na parte superior do rolo. Os equipamentos de separação magnética por rolo de magneto permanente podem ser apresentados tanto com um rolo simples como com uma seqüência de rolos. Um equipamento em escala industrial pode ser observado na Figura 2.22.



Figura 2.22: Concentrador de rolo magnético permanente ERIEZ®.

No presente trabalho foi empregado, em escala laboratorial, um separador de rolo simples, de magneto permanente, STEINERT®.

2.9 Variáveis do beneficiamento magnético

A elaboração detalhada das variáveis operacionais para o processo de separação magnética é trivial, uma vez que as mesmas estão ligadas ao tipo de separador ou ao próprio método de separação. De um modo geral, não existe um conjunto genérico de variáveis que permita o controle operacional da separação magnética. Por essas e outras razões, as presentes informações limitam-se a comentar algumas variáveis que afetam a otimização do processo de separação.

2.9.1 Intensidade de Campo Magnético

A natureza do campo magnético tem marcada influência na separação dos diferentes tipos de minerais. A história da separação magnética revela que sua aplicação, em escala contínua, só foi possível quando se produziu um campo magnético convergente para o qual fluem as partículas com maior suscetibilidade magnética. Por outro lado, o controle da intensidade de campo permite a separação seletiva das partículas com diferentes valores na suscetibilidade magnética. Com baixa intensidade de campo separam-se minerais com elevada suscetibilidade, e com alta intensidade separam-se aqueles com valores mais baixos desse parâmetro. Em geral, o controle da intensidade de campo é feito com o emprego de eletroímãs, variando a corrente elétrica. Para alguns separadores pode-se variar o campo mediante ajuste prévio da distância entre os dois pólos. Os equipamentos com ímãs permanentes não apresentam maior flexibilidade em relação à variação da intensidade de campo, quando comparados aos equipados com eletroímãs (LUZ, 2004).

2.9.2 Alimentação

O controle da velocidade de passagem das partículas minerais, através do campo magnético, constitui uma das variáveis operacionais. No caso da separação a seco, é conveniente que o leito das partículas que atravessa o campo não seja espesso, pois em tais condições somente as partículas situadas na superfície do leito serão atraídas pelo campo. De outro modo, partículas magnéticas situadas na camada inferior do leito arrastarão aquelas não magnéticas, situadas na camada superior, contaminando o concentrado. A alimentação ideal, para os separadores de correias cruzadas, seria aquela cujo leito fosse constituído por uma única camada, o que nem sempre se verifica na prática. Tal procedimento diminui substancialmente a produção, contudo aumenta a seletividade.

O excesso de alimentação acarreta a formação de oclusões de minerais não magnéticos, dentro dos flocos magnéticos, prejudicando a separação, a seco, principalmente quando se trabalha com material fino e de elevada suscetibilidade. Tal contaminação deve-se não só à formação de flocos, como também à formação de cadeias instantâneas de partículas magnetizadas que arrastam as não magnéticas. Nos separadores a úmido não há grande velocidade das partículas na direção da maior intensidade de campo, devido à resistência

oferecida pela água. Além de controle da alimentação, em alguns casos, é usado o recurso da reversão na polaridade para minimizar o efeito de adesão. (LUZ, 2004)

2.10 Avanços na separação magnética

O uso da tecnologia de supercondutores combinada ao princípio da separação magnética em tambor resultou em um dos maiores avanços no processamento de materiais paramagnéticos. Dessa forma, a combinação resultou na obtenção de um campo magnético com intensidade elevada, para promover a polarização do material, como também um gradiente elevado de campo, que proporciona forças magnéticas de alta intensidade sobre o material submetido à separação. Tal tipo de separação, adequado ao tratamento de minerais com baixas suscetibilidades magnéticas mesmo a granulometrias finas, apresenta, entre outras, as seguintes vantagens:

- o emprego de campo magnético acima de 4,0 T, sem que haja a saturação magnética do ferro, que constitui o separador na zona de separação;
- elevada taxa de produção tanto para material fino quanto grosso, devido à flexibilidade do sistema em operar com uma camada espessa do material sobre o tambor;
- não há aprisionamento do material grosso ou fortemente magnético dentro da área de maior densidade de fluxo magnético, portanto não há necessidade da pré-concentração para remoção do material ferromagnético;
- possui a vantagem de se operar tanto a seco quanto a úmido, para um mesmo sistema, modificando apenas a posição do tambor.

Embora os separadores com supercondutores apresentem razões que justificam sua utilização, ainda são encontradas dificuldades na sua aplicação em alta escala. A economia real de energia não é tão elevada, pois as operações de resfriamento das bobinas apresentam um alto consumo de energia. A alta nos custos de energia elétrica tornou um dos obstáculos na utilização do processo de separação magnética. Um avanço foi dado na construção de ímãs permanentes usando ligas de samário-cobalto (Sm-Co) e de neodímio-ferro-boro (Nd-Fe-B), possibilitando a obtenção de um ímã permanente capaz de induzir um campo com intensidade de 1,8 T e também gradiente elevado. As características tanto de campo quanto de gradiente

são similares às aquelas obtidas com separadores que utilizam eletroímãs. (LUZ, 2004)

O novo tipo de equipamento proporciona, entre outras, as vantagens:

- assegura maior densidade de fluxo magnético, mesmo para o caso de alimentação com granulometria grossa;
- baixo custo operacional e de capital para instalação de capacidade média, viabilizando, em particular, sua aplicação às purificações de refratários, materiais cerâmicos e minerais industriais;
- possibilidade de operação com materiais contaminados com substâncias ferromagnéticas e ausência de aquecimento, comum aos eletroímãs;
- flexibilidade operacional que permite variar o campo magnético mediante o deslocamento do tambor.

Espera-se, no entanto, o desenvolvimento de novos materiais para construção de ímãs permanentes, em decorrência dos elevados custos de obtenção dos elementos de terras raras. Sabe-se que a área de aplicação para esse novo tipo de equipamento está assegurada. Existe, todavia, a expectativa de desenvolver equipamentos com maior desempenho, visando o aumento da capacidade e redução do custo por unidade instalada. (LUZ, 2004)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo exploratório foi escolhido devido à carência de publicações na área de concentração magnética para a escória provinda da produção de aço inoxidável. Apesar de haver vários estudos no campo do processamento de escórias, o conhecimento é limitado quando se trata da aplicação da separação magnética para este material visando à recuperação de metais (SHEN, 2005). Desta forma, conforme Selltiz (1974) “no caso de problemas em que o conhecimento é reduzido, geralmente o estudo exploratório é o mais recomendado”.

A utilização da pesquisa exploratória também se justifica pela necessidade de se descobrir intuições e orientar futuros trabalhos. Além disso, esse tipo de estudo demanda uma metodologia menos estruturada e não exige amostragem probabilística, sendo suficiente o uso de pequenas amostras. A pesquisa exploratória permite o desenvolvimento de um painel com os principais resultados da pesquisa (CERVO e BERVIAN, 2002).

3.1 Coleta e preparação de escória

Esta etapa do processo consiste na coleta do material de forma que este se torne representativo. A escória de aço inoxidável, amostra para este trabalho, foi coletada no pátio de resíduos da empresa GERDAU, localizada na cidade de Charqueadas, no Rio Grande do Sul – Brasil. As coletas foram realizadas, seguindo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 10007), em pontos distintos dos rejeitos da escória: na base, no corpo e no topo da pilha de escória, totalizando aproximadamente 200 Kg de escória. O material, oriundo da coleta, já constituído por partículas menores que 30 mm, foi então homogeneizado e quarteado, obtendo-se assim 10 frações de 20 Kg de amostra, as quais foram acomodadas em caixas e enviadas à Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen (Alemanha),

onde foram realizadas as seguintes etapas do presente trabalho.

O preparo das amostras foi realizado com a cominuição por meio de britador de martelos adaptado com peneira de 2 mm, e quarteamento para se obter frações de acordo com as necessidades para os ensaios.

Com a intenção de averiguar a concentração dos metais, visados por este trabalho, em faixas granulométricas abaixo de 2 mm, foi estudada a relação de granulometria e constituição da escória. Para tal, a escória proveniente do moinho de martelos (-2 mm) foi submetida a um corte granulométrico por peneiras, seguido de uma análise química para a caracterização das diferentes granulometrias.

Anterior ao processamento magnético foi realizado um corte granulométrico gerando duas amostras. Uma amostra abaixo de 0,3 mm e outra entre 2 e 0,3 mm, este corte é decorrente do comprovado aumento da interação entre as partículas magnéticas para com as não magnéticas, fato que ocorre devido à formação de cadeias e ou flocos do material magnético, encapsulando e ou arrastando assim o material mais fino não magnético. Tal comportamento resulta em um concentrado de menor teor, diminuindo consideravelmente a eficiência do beneficiamento magnético (Luz, 2004). Sendo assim o presente trabalho adotou, para a realização das análises, somente a fração de amostra com granulometria entre 2 e 0,3 mm sendo desconsideradas as partículas abaixo de 0,3 mm.

3.2 Beneficiamento magnético da escória

Para a realização deste trabalho foram utilizados 3 equipamentos de separação magnética.

3.2.1 Separador magnético, rolo induzido

Equipamento laboratorial de bancada da empresa CARPCO[®], demonstrado na figura 3.1, constituído de um rolo eletromagnético, com intensidade de campo magnético e velocidade, reguláveis.

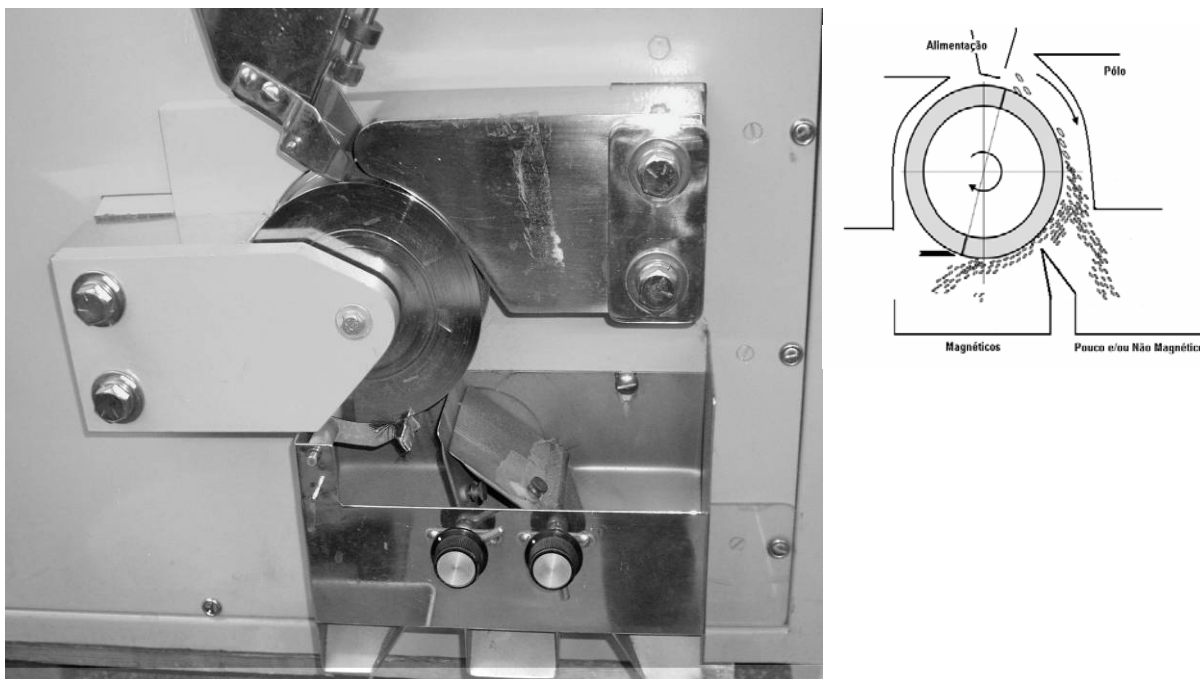


Figura 3.1: Separador magnético por rolo induzido, de bancada Carpcó®.

A utilização deste equipamento consiste na regulagem prévia, através de um painel de controle, da intensidade do campo magnético e da velocidade de rotação do rolo. A configuração das alhetas situadas abaixo do rolo, demonstradas no esquema da figura 3.1 e no detalhe na figura 3.2, tem por objetivo uma separação entre concentrado, mistos e rejeito da separação magnética. O presente trabalho desconsiderou os mistos, realizando a coleta dos mistos e dos rejeitos em um mesmo recipiente coletor.

A alimentação é realizada através de um alimentador vibratório, com uma vazão de aproximadamente 250 gramas por minuto, o qual direciona a amostra a um funil que possui uma abertura em forma de guilhotina para assegurar que a amostra seja alimentada da forma mais uniforme possível sobre o rolo. O equipamento possui ainda uma escova de limpeza para que o material que está magneticamente aderido ao rolo seja direcionado ao recipiente coletor não interferindo na rotação do mesmo.

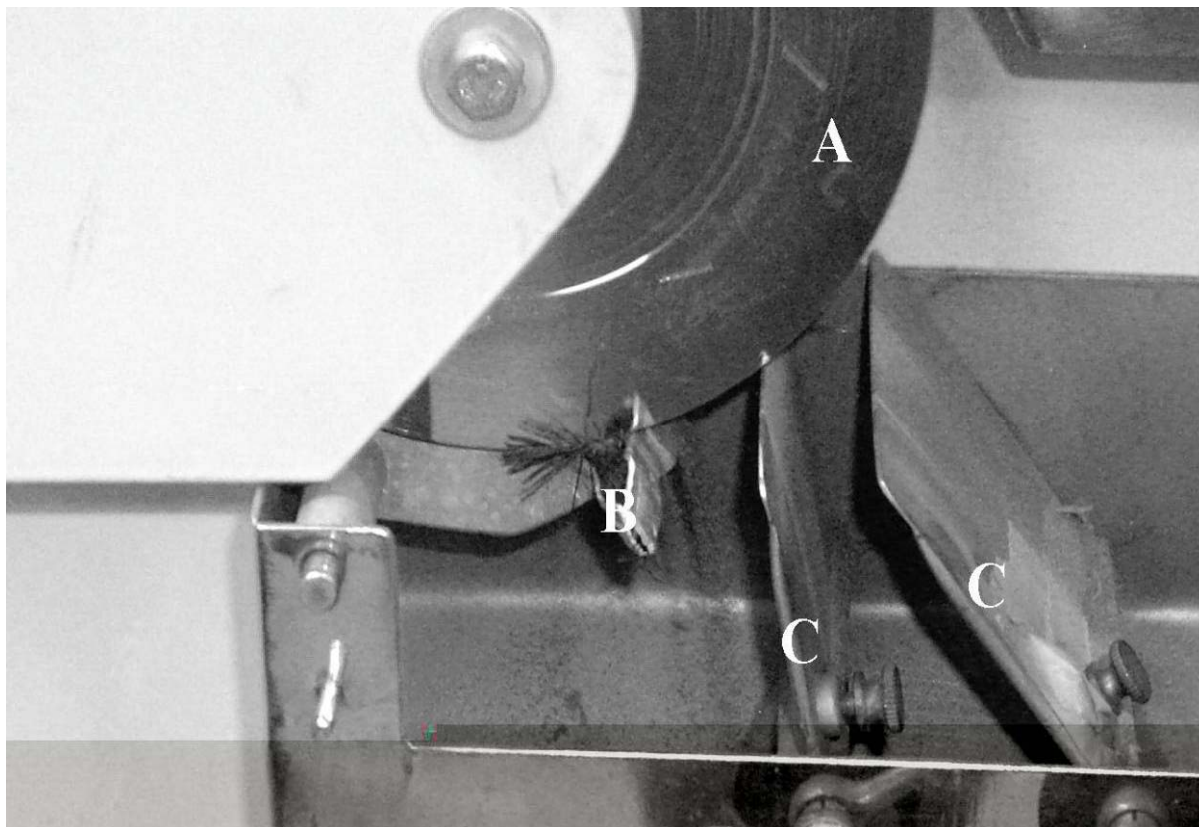


Figura 3.2: rolo magnetizado (A), escova de limpeza (B) e alhetas de separação (C).

3.2.2 Separador magnético, rolo com magnetos permanentes

Equipamento industrial em escala laboratorial, da empresa STEINERT[®], constituído de um rolo de magnetos permanentes (0,15 Tesla) e, no caso, de velocidade também fixa. Para o emprego deste equipamento a amostra é alimentada através de uma calha vibratória a seco, sendo a amostra aplicada diretamente na parte superior do rolo, conforme a figura 3.3. O alimentador também tem como objetivo distribuir a amostra uniformemente sobre o rolo magnético. Após a passagem da amostra o material magnético é concentrado em um recipiente coletor na parte traseira do equipamento e os resíduos pouco ou não magnéticos a frente do rolo.



Figura 3.3: Separador de Rolo Magnético Permanente STEINERT® e calha vibratória.

3.2.3 Separador magnético de alta intensidade

Equipamento industrial em escala laboratorial, também da empresa STEINERT®, constituído de dois rolos, um rolo de magnetos permanentes de alta intensidade (1,5 Tesla) e o outro responsável pela rotação da esteira, de velocidade fixa, sobre o qual a amostra é alimentada. A alimentação é realizada com uma calha vibratória no início da esteira, tendo-se o rolo magnético como o fim da mesma. Na figura 3.4 pode-se observar o separador de alta intensidade a seco, a calha vibratória e os recipientes para a coleta do concentrado magnético, mistos e rejeito não magnético.



Figura 3.4: Separador magnético de alta intensidade STEINERT®.

Para esta etapa do trabalho também foram obtidas apenas duas frações, uma para concentrado magnético e outra para rejeito, tendo-se como padrão a coleta dos mistos juntamente com o rejeito.

3.3 Análise química

Os processos de concentração magnética da escória geraram concentrados magnéticos e rejeitos. Tanto os concentrados quanto os rejeitos foram submetidas à análise química para a determinação dos teores de seus constituintes e assim, a recuperação dos mesmos, porém previamente foram submetidos a uma preparação que consistiu em sua pulverização por pulverizador de anéis concêntricos.

Tendo sido realizada a pulverização das amostras, estas foram submetidas à análise por digestão química e leitura da concentração dos metais através de Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-AES, Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry), conforme procedimento elucidado pelo laboratório de metalurgia da RWTH-Aachen, demonstrado a seguir.

Procedimento seguido pelo laboratório de química metalúrgica:

- Colocar 2,5 g até 5 gramas de amostra em um Erlenmeyer de 750 ml, adicionar 250 ml de metanol e 25 ml de Bromo;
- A amostra deve permanecer sob agitação (mesa de agitação) por uma hora;
- Após a agitação, filtrar com filtro faixa vermelha. Reservar o líquido filtrado.
- Lavar o filtro na seguinte seqüência:
 - Metanol (uma vez)
 - Metanol+HCl 0,1N 50/50 (três vezes)
 - HCl 0,1N (três vezes)
- Acondicionar o filtro em um prato (ou cadinho) de platina, e levar seu conteúdo às cinzas com temperatura de 500 °C;
- Adicionar 2 ml de ácido fluorídrico e HNO₃ até a solução clarear;
- Adicionar uma ou duas gotas de H₂SO₄, levar a mufla para calcinação a 1000 °C;
- Depois de resfriado, levar o material restante deve à chama com a adição de Na₂CO₃ / K₂CO₃, por 10 – 30 minutos, até fusão em tonalidade vermelha;
- Dissolver esse material com adição de água e HNO₃, diluir esta solução até 500 mL e analisar para a determinação do teor de ferro, cromo e níquel (ICP);
- Adicionar à solução de Bromo-metanol, coletada e reservada na primeira filtração, 2,5 ml de H₂SO₄ (50%);
- Aquecer em placa de aquecimento até o aparecimento de fumos brancos;
- Adicionar 150 ml de água e 5 ml de HCl e aquecer a amostra até ebulição;
- Elevar o volume à 500 ml e analisar para a determinação da fração dos metais que se encontram em estado elementar (ICP).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a realização do presente trabalho, este foi dividido em quatro etapas. Primeiramente a amostra de escória foi caracterizada pela sua distribuição granulométrica e também para a presença dos elementos ferro, cromo e níquel na amostra como um todo e para cada corte granulométrico. As outras três etapas se referem ao beneficiamento magnético propriamente dito sendo elas:

- Caracterização magnética com seis campos magnéticos distintos, de 0,05, 0,1, 0,2, 0,4, 0,8 e 1,2 Tesla, e duas velocidades do rolo magnético, de 20 e 40 rpm;
- Estudo de beneficiamento magnético seqüencial para a mesma amostra variando-se a intensidade do campo magnético em 1,2, 0,8, 0,4 e 0,2 Tesla. Para tal o concentrado magnético foi utilizado como alimentação para o seguinte processo de menor intensidade, e;
- Beneficiamento magnético seqüencial, com utilização dos separadores magnéticos industriais em escala laboratorial, de alta e de baixa intensidade.

Com base nos resultados destas etapas será possível observar o efeito do beneficiamento magnético na escória de aço inox, avaliando-se assim as conseqüências das alterações dos parâmetros selecionados no beneficiamento do material. Deve-se observar que as análises químicas foram aplicadas após a geração dos concentrados e rejeitos de todas as etapas de processamento magnético.

4.1 Caracterização da Amostra

A amostra de escória de aço inoxidável foi caracterizada pela sua distribuição granulométrica e também pela presença dos elementos ferro, cromo e níquel na amostra considerada como a alimentação e para cada corte granulométrico.

Após a realização das análises dos teores de Fe, Cr e Ni presentes na escória coletada os dados demonstrados na Tabela 4.1 foram obtidos.

Tabela 4.1: Teor de ferro, cromo e níquel, da escória coletada na GERDAU

Constituinte	Teor total	Teor metálico
Fe ₂ O ₃	10,2%	2,85%
Cr ₂ O ₃	2,35%	0,65%
NiO	0,27%	0,25%

Considerando que as análises foram realizadas para a determinação dos teores totais e metálicos, os resultados dos teores totais representam a soma dos elementos em estado óxido, metálicos e ligas e/o complexos, e esta expressa sob a forma de óxidos, os metálicos por sua vez representam somente os elementos em estado elementar, presentes em ligas ou isolados na matriz da escória. Tais valores demonstram que a escória já beneficiada para materiais metálicos grosseiros, contém em média 10,2% de óxido de ferro (Fe₂O₃); 2,35% de sua massa é óxido de cromo (Cr₂O₃) e apenas 0,27% do seu total é óxido de níquel (NiO). Para os elementos em estado metálico podem ocorrer variações de teor devido a não digestão de 100% do material neste estado no processo químico de abertura da amostra, porém este comportamento foi minimizado com a pulverização da amostra anteriormente a análise química. Os teores acima apresentados representam a escória entre 2 e 0,3 milímetros, e segundo Zettermann (2001), devido à composição irregular da escória, podem ocorrer alterações para o teor dos mesmos metais presentes na alimentação dos beneficiamentos magnéticos realizados. A escolha da granulometria entre 2 e 0,3 milímetros esta diretamente relacionada a afirmações de Shen (2004), Sripriya (2004) e Alannyali (2006) de que partículas finas são de difícil remoção por meios físicos, por adquirirem carga magnética na presença de um campo e assim se comportarem como uma massa magnética, atrapalhando na remoção do material granulado, gerando uma difícil otimização do processo.

A caracterização por corte granulométrico, por sua vez, objetivou determinar a composição química da escória referente à presença e teor dos elementos ferro, níquel e cromo em determinados cortes granulométricos. Após a realização dos cortes granulométricos, de acordo com a Tabela 4.2, ficou evidenciado que à medida que a granulometria reduz, ocorre uma redução nos teores dos elementos ferro, cromo e níquel. O teor de ferro diminui de 11,55% para 8,26% entre as granulometria de -2 mm +1 mm e passante em 0,063 mm. Porém possui certa constância de aproximadamente 9,8% em seu teor para as frações granulométricas -1 +0,63 mm; -0,63 +0,315 mm e -0,315 +0,1 mm. O níquel demonstrou uma queda significativa de seu teor quando comparadas as granulometrias de -2 mm +1 mm e passante em 0,063 mm, tendo a primeira um teor de 0,64% e a última 0,04% de níquel em sua constituição, tal dado corrobora com Shen (2004) que afirma que o níquel, em sua grande maioria, esta presente na escória sob forma metálica contido em ligas, as quais normalmente se encontram acima desta granulometria. O cromo por sua vez demonstrou um comportamento diferente tendo seu maior teor, de 3,17% para a granulometria -1 +0,63 mm, e a partir daí tendo seu teor reduzido, atingindo um teor de 1,16% para a amostra passante em 0,063 mm.

Tabela 4.2: Distribuição granulométrica e respectivos teores de ferro, níquel e cromo.

Corte Granulométrico (%massa)	Teor de Fe ₂ O ₃	Teor de Cr ₂ O ₃	Teor de NiO
-2 +1 mm (10,27%)	11,55%	2,65%	0,64%
-1 +0,63 mm (18,04%)	9,86%	3,17%	0,48%
-0,63 +0,315mm (24,31%)	9,73%	2,59%	0,46%
-0,315 +0,1 mm (25,16%)	9,81%	2,37%	0,23%
-0,1 +0,063 mm (6,88%)	8,47%	2,11%	0,06%
-0,063 mm (15,33%)	8,26%	1,16%	0,04%
Massa total: 100% = 2472g			

4.2 Caracterização Magnética.

Para esta etapa, dos ensaios magnéticos, as amostras com granulometria de -2 mm +0,3 mm foram submetidas a um campo magnético alterando-se a intensidade de fluxo aplicado e utilizando-se duas velocidades de rotação do rolo. O equipamento utilizado para esta etapa foi um concentrador eletromagnético de laboratório, CARPCO[®] *High-Intensity Inducted-Roll Magnetic Separator*. As intensidades de fluxo magnético foram escolhidas nos valores de 0,05, 0,1, 0,2, 0,4, 0,8 e 1,2 Tesla tendo-se como base os trabalhos de Sripriya (2004) e Alanyali (2006) os quais utilizaram forças magnéticas de no máximo de 0,15 Tesla

obtendo um concentrado de razoável teor porém uma recuperação muito baixa dos metais, caracterizando a concentração quase que somente de partículas em estado metálico e não efetuando assim uma “limpeza” do resíduo. Sendo assim as intensidades adotadas tiveram objetivo de abranger intensidades fracas, médias e altas de campo magnético, e assim demonstrar que a separação magnética pode ser efetiva para a recuperação e/ou remoção dos metais presentes na escória.

O fluxograma apresentado na Figura 4.1 demonstra a metodologia utilizada para a realização das concentrações magnéticas. O procedimento foi realizado duas vezes, sendo uma para a velocidade de rotação do rolo induzido de 20 rotações por minuto (rpm) e outra com a rotação fixada em 40 rpm. Tal procedimento resultou na obtenção de 12 concentrados e 12 rejeitos, sendo 6 concentrados e rejeitos para cada velocidade fixada. Essas duas velocidades foram adotadas, para se observar o comportamento da escória perante a separação magnética, tendo como base o estudo de Alanyali (2006) o qual fixou a velocidade de 36 rpm sem fornecer esclarecimentos referentes aos efeitos referentes à alteração da mesma.

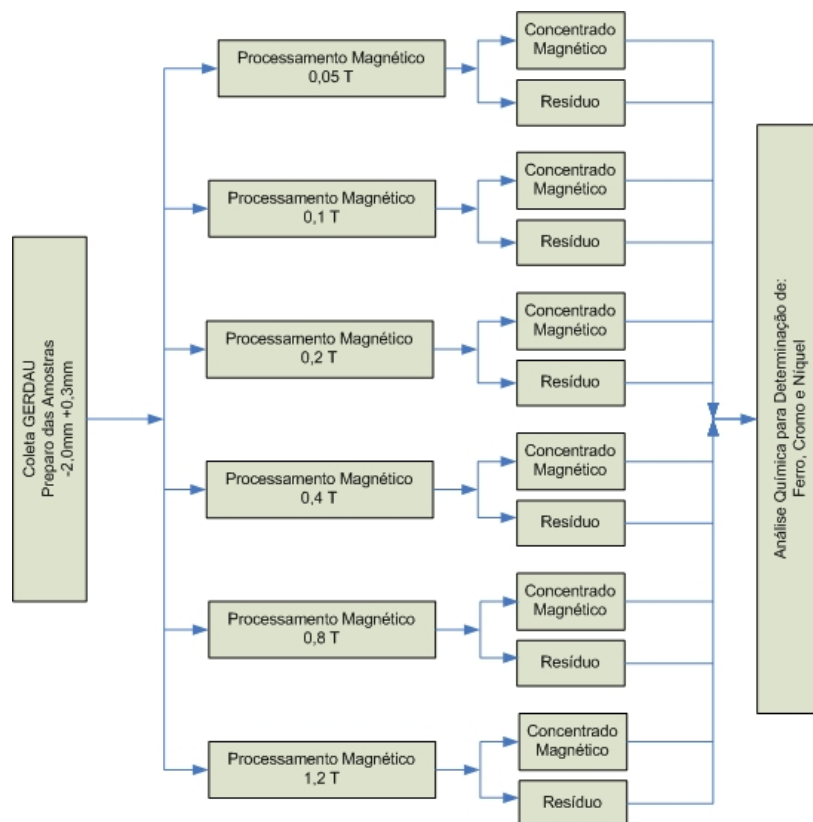


Figura 4.1: Metodologia para caracterização magnética (20 e 40 rpm)

4.2.1 Análise do teor de Fe, Cr e Ni totais para o concentrado magnético e rejeito

Após a realização dos testes, foram obtidas as frações de recuperação mássica dos concentrados magnéticos e de rejeitos conforme a Tabela 4.3, onde se pode observar o efeito da alteração da velocidade do rolo induzido. Com uma velocidade maior teve-se uma maior recuperação mássica da escória. Comportamento o qual concorda com Schubert (1978) que indica que, no rolo magnético com alimentação superior, com o aumento da velocidade as partículas magnéticas maiores podem aprisionar as não ou pouco magnéticas menores, antes que estas tenham tempo de sofrer a ação da gravidade se desvencilhando da “armadilha” e assim se desprendendo do rolo magnético. As recuperações mássicas da escória para os campos magnéticos de 0,05, 0,1, 0,2, 0,4, 0,8 e 1,2 Tesla foram de 5,17%, a 69,34% para uma velocidade de rotação de 20 rpm do rolo magnético e de 6,95%, a 75,77% para uma velocidade de 40 rpm do rolo magnético.

Tabela 4.3: Frações mássicas para concentrados magnéticos e rejeitos.

Intensidade do Campo Magnético	Concentrado magnético		Rejeito	
	20 RPM	40 RPM	20 RPM	40 RPM
0,05 Tesla	5,17%	6,95%	94,83%	93,05%
0,1 Tesla	8,46%	9,88%	91,54%	90,12%
0,2 Tesla	13,97%	16,28%	86,03%	83,72%
0,4 Tesla	27,31%	30,26%	72,69%	69,74%
0,8 Tesla	55,73%	58,21%	44,27%	41,79%
1,2 Tesla	69,34%	75,77%	31,66%	24,23%

O beneficiamento magnético da escória e a análise química, para determinação dos teores totais de Fe, Cr e Ni, expressos em porcentagem de óxidos, presentes tanto no concentrado magnético como no rejeito, forneceram os resultados de acordo com as Tabelas 4.4 e 4.5 respectivamente.

Tabela 4.4: Resultados da caracterização magnética para o concentrado.

Intensidade do campo magnético	Concentrado Magnético					
	Teor de Fe ₂ O ₃		Teor de Cr ₂ O ₃		Teor de NiO	
	20RPM	40RPM	20RPM	40RPM	20RPM	40RPM
0,05 Tesla	46,20%	46,23%	2,77%	2,44%	0,54%	0,48%
0,1 Tesla	42,34%	37,95%	2,9%	2,54%	0,34%	0,40%
0,2 Tesla	32,68%	30,05%	2,38%	2,69%	0,34%	0,32%
0,4 Tesla	26,56%	21,02%	2,37%	3,52%	0,36%	0,29%
0,8 Tesla	17,81%	16,69%	2,32%	2,79%	0,38%	0,40%
1,2 Tesla	15,61%	13,48%	2,42%	2,53%	0,32%	0,29%

Observando o elemento ferro, na Tabela 4.4, ocorre uma redução do teor do concentrado à medida que se aumenta o campo magnético. Para a velocidade de 20 rpm, ferro demonstrou teores de 46,20%, 42,34%, 32,68%, 26,56%, 17,81% e 15,61% para os concentrados de 0,05, 0,1, 0,2, 0,4, 0,8 e 1,2 Tesla respectivamente e para a velocidade de 40 rpm os teores respectivos aos mesmos campos magnéticos foram 46,23%, 37,95%, 30,05%, 21,02%, 16,69% e 13,48%. O elemento níquel quando concentrado com velocidade do rolo de 20 rpm teve uma redução de 0,54% para 0,34% de seu teor entre 0,05 e 0,1 Tesla, porém se manteve praticamente constante para os demais campos magnéticos, diferente do que ocorreu com o aumento da velocidade para 40 rpm, quando ocorreu uma variação no teor do níquel nos concentrados. A queda nos teores dos metais se dá devido ao aumento da massa do concentrado causado pelo arrasto de materiais não magnéticos pelos materiais magnéticos e ou pouco magnéticos, através de aglomerados e ou superposição de camadas durante o beneficiamento, porém quando ocorre o aumento da massa e um aumento do teor fica claro que o campo magnético está atuando sobre o metal concentrando-o, como pode ser visto para o níquel no campo magnético de 0,8 Tesla.

Por sua vez, o cromo que possui propriedades magnéticas distintas do ferro e do níquel se comporta de outra forma. Com susceptibilidade magnética fraca dos epinélios de cromo $[(Fe, Mg).(Cr, Al, Fe)_2O_4]$ e diamagnéticas do cromo metálico (Schubert, 1978) a concentração do cromo depende diretamente das proporções destes compostos, entre outros, materiais na escória, e do campo magnético forte o suficiente para concentrar, no caso, os óxidos e ligas metálicas.

Tabela 4.5: Resultados da caracterização magnética para o resíduo.

Intensidade do campo magnético	Resíduo					
	Teor de Fe_2O_3		Teor de Cr_2O_3		Teor de NiO	
	20RPM	40RPM	20RPM	40RPM	20RPM	40RPM
0,05 Tesla	7,45%	6,04%	2,07%	2,77%	0,22%	0,18%
0,1 Tesla	7,02%	6,38%	2,23%	2,7%	0,23%	0,2%
0,2 Tesla	5,86%	5,44%	2,13%	2,66%	0,18%	0,17%
0,4 Tesla	4,83%	5,18%	2,23%	2,56%	0,18%	0,13%
0,8 Tesla	1,59%	1,62%	1,78%	1,41%	0,02%	<0,01%
1,2 Tesla	1,09%	1,03%	1,17%	1,19%	<0,01%	<0,01%

Conforme demonstrado na Tabela 4.4, com velocidade de 40 rpm, inicialmente o teor de cromo aumenta com o aumento do campo magnético, sendo de 2,44%, 2,54%, 2,69% e 3,52%

para os campos de 0,05, 0,1, 0,2 e 0,4 Tesla respectivamente, mas com a aplicação dos campos de 0,8 e 1,2 Tesla ocorre uma redução do seu teor devido o aumento substancial da massa do concentrado. Com a velocidade de 20 rpm o cromo também se comporta de forma irregular, tendo teores de 2,77%, 2,9%, 2,38%, 2,37%, 2,32 % e 2,42% respectivamente para os campos magnéticos de 0,05, 0,1, 0,2, 0,4, 0,8 e 1,2 Tesla. Conforme já mencionado, esse fato está associado à velocidade do processo, e também à presença de óxidos de cromo e ferro e ou ligas metálicas, susceptíveis magneticamente somente aos campos de maior intensidade, ocasionando uma maior recuperação destes materiais com a aplicação de campos magnéticos mais intensos, e gerando uma concentração imprevisível deste material quando à aplicação de campos magnéticos de baixa intensidade caso ele esteja em uma liga metálica de maior susceptibilidade magnética. Sendo assim, a presença de cromo em concentrados de alta susceptibilidade magnética irá variar de acordo com a presença destas ligas metálicas e do arraste de óxidos contendo cromo, sendo difícil o controle da sua concentração magnética.

4.2.2 Análise da recuperação de Fe, Cr e Ni

Após a análise dos teores do concentrado magnético é possível realizar o cálculo da recuperação do ferro, do cromo e do níquel. A recuperação é a forma de demonstrar a quantidade, em percentual, dos elementos (Fe, Cr e Ni) presentes no concentrado magnético, em relação a sua quantidade total na amostra, sendo um valor de grande importância sob o ponto de vista do reaproveitamento do material e da limpeza do resíduo. Devido à variação da constituição da escória em relação ao teor dos metais na alimentação (Zettermann, 2001) o cálculo da recuperação se deu com a observação do teor dos constituintes no concentrado e no rejeito e assumindo que a soma dos mesmos representa 100% do total do constituinte na alimentação do beneficiamento. A recuperação percentual dos elementos presentes no concentrado pode ser observada conforme a Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Recuperação do Ferro, do Cromo e do Níquel após concentração magnética.

Intensidade do campo magnético	Recuperação no Concentrado Magnético					
	Fe ₂ O ₃		Cr ₂ O ₃		NiO	
	20RPM	40RPM	20RPM	40RPM	20RPM	40RPM
0,05 Tesla	25,28%	36,37%	6,80%	6,17%	11,81%	16,61%
0,1 Tesla	35,80%	39,48%	10,73%	9,35%	12,02%	17,99%
0,2 Tesla	47,53%	51,78%	15,36%	16,43%	23,48%	26,79%
0,4 Tesla	67,38%	63,78%	28,53%	37,37%	42,90%	49,18%
0,8 Tesla	93,38%	95,76%	62,18%	73,45%	95,5%	≅100%
1,2 Tesla	97,01%	97,61%	82,32%	86,86%	≅100%	≅100%

Aqui, na Tabela 4,6, se observa que o cromo, para os campos magnéticos de 0,2, 0,4, 0,8 e 1,2 Tesla possui um pequeno aumento da recuperação com o aumento da velocidade do processo. A recuperação do cromo foi de 15,36%, 28,53%, 62,18% e 82,32% para os campos magnéticos de 0,2, 0,4, 0,8 e 1,2 Tesla, respectivamente, com a velocidade de 20 rpm, e de 16,43%, 37,37%, 73,45% e 86,86% para os mesmos campos magnéticos com a velocidade de 40 rpm. O níquel por sua vez teve um aumento de sua recuperação em todos os campos magnéticos aplicados com o aumento da velocidade de 20 para 40 rpm, sua recuperação aumentou de 11,81% para 16,61% com o campo magnético de 0,05 Tesla, de 12,02% para 17,99% com o campo de 0,1 Tesla, de 23,48% para 26,79% para o campos de 0,2 Tesla e de 42,9% para 49,16% com a aplicação do campo de 0,4 Tesla, atingido aproximadamente 100% para ambas as velocidades com o campo magnético de 1,2 Tesla.

A recuperação do ferro sofreu um aumento com a elevação da velocidade, de 20 rpm para 40 rpm, do processo. Sendo que a recuperação do ferro variou de 25,28% para 36,37% com o campo magnético de 0,05 Tesla, de 35,80% para 39,48% com o campo de 0,1 Tesla, e de 47,53% para 51,78% para o campo de 0,2 Tesla. Porém, para o campo magnético de 0,4 Tesla a recuperação do ferro sofreu uma pequena redução de 67,38% para 63,78%, voltando a aumentar, com alteração da velocidade do rolo magnético, para o campo de 0,8 Tesla onde teve sua recuperação elevada de 93,38% para 95,76%. O campo magnético de 1,2 Tesla não demonstrou alteração para a recuperação do ferro com a alteração da velocidade.

Este aumento da recuperação dos metais, quando comparadas as duas velocidades, está também relacionado com o aumento da recuperação mássica da escória resultante do aumento da velocidade do beneficiamento.

Quando analisada a recuperação dos metais em questão, observa-se, nas Figuras 4.2 e 4.3, que a recuperação tanto do Fe quanto do Ni aumenta com o aumento do campo magnético, atingindo patamares de 97,61% e de aproximadamente 100% de Fe e Ni respectivamente.

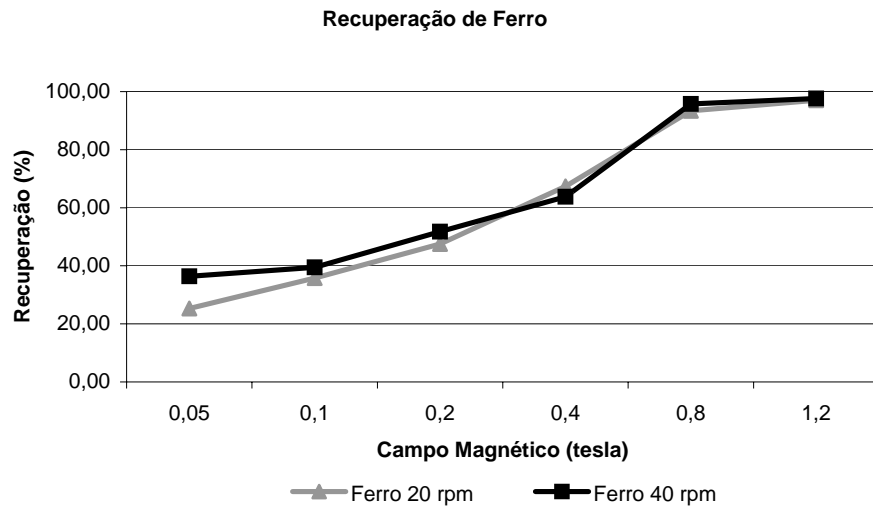


Figura 4.2: Recuperação de Ferro para 20 e 40 rpm

Também se pode perceber que a alteração da velocidade, de 20 para 40 rpm, influi muito pouco na concentração dos metais. Para a recuperação do ferro o aumento da velocidade do rolo influi apenas com um baixo campo magnético onde gera um aumento de aproximadamente 11% na recuperação do ferro, para o níquel o aumento da velocidade faz com que a recuperação tenha um incremento em média de 5%. Aumentando a recuperação tanto para campos magnéticos baixos quanto para mais fortes.

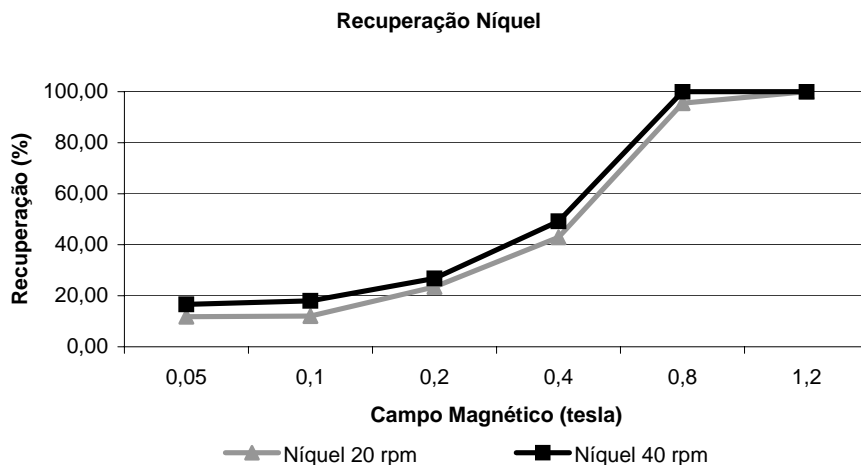


Figura 4.3: Recuperação de Níquel para 20 e 40 rpm

Ainda pode-se observar, na figura 4.4, que a alteração da velocidade do rolo, confere, para a recuperação do cromo uma significativa alteração. Um aumento de aproximadamente 10%, para os campos magnéticos de 0,4 e 0,8 Tesla e de aproximadamente 5% para o campo de 1,2 Tesla, sendo para este um pouco inferior. A alteração da velocidade não forneceu

alterações consideráveis para os demais campos magnéticos.

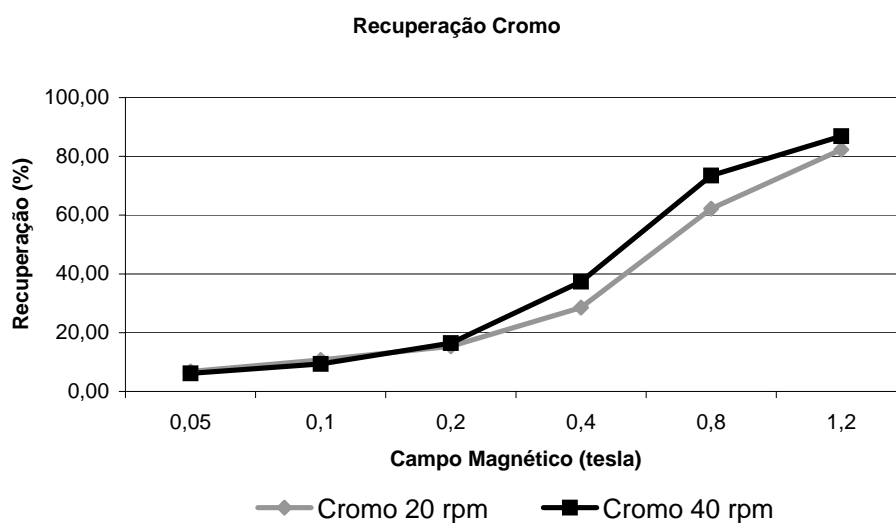


Figura 4.4: Recuperação de Cromo para 20 e 40 rpm.

Observando-se os gráficos de recuperação pode-se verificar a influência do campo magnético na recuperação dos metais, estes valores de recuperação também estão relacionadas com o aumento da recuperação mássica do concentrado (Tabela 4.1) ocasionada pelo aumento da intensidade do campo magnético.

4.2.3 Teor e recuperação de Fe, Cr e Ni metálicos

Para esta etapa do trabalho apenas os concentrados obtidos com a velocidade de 40 rpm foram selecionados, tendo em vista a melhor recuperação apresentada por esta configuração. Quando comparados os teores referentes aos elementos em estado metálico podemos observar, na Tabela 4.7, que o ferro apresenta teores de 20,26%, 16,27%, 10,18%, 5,77%, 4,26%, e 3,39% (como Fe_2O_3) quando submetido aos campos magnéticos de 0,05, 0,1, 0,2, 0,4, 0,8 e 1,2 Tesla respectivamente. O níquel por sua vez aparece com teores de 0,44%, 0,36%, 0,30%, 0,29%, 0,36% e 0,29% (como NiO) nesses concentrados.

O cromo, em estado elementar, pode estar em forma de ligas metálicas, tendendo a se comportar como material ferromagnético de baixa susceptibilidade. Os teores de cromo metálico nos concentrados obtidos com a aplicação dos campos magnéticos de 0,05, a 1,2

Tesla variam entre 1,13%, a 0,65% (como Cr_2O_3) respectivamente.

Tabela 4.7: Teor, nos concentrados, dos elementos em estado metálico.

Campo Magnético	Concentrado Magnético		
	Fe	Cr	Ni
0,05	20,26%	1,13%	0,44%
0,1	16,27%	1,00%	0,36%
0,2	10,18%	0,79%	0,30%
0,4	5,77%	0,69%	0,29%
0,8	4,26%	0,69%	0,36%
1,2	3,39%	0,65%	0,29%

Na tabela 4.8 se pode observar a recuperação dos elementos ferro, cromo e níquel em estado metálico após as concentrações magnéticas. A recuperação foi calculada comparando a quantidade de elementos em estado metálico nos concentrados com os mesmos a alimentação, para cada amostra.

Tabela 4.8: Recuperação dos elementos em estado metálico

Campo Magnético	Concentrado Magnético		
	Fe	Cr	Ni
0,05	47,04%	11,33%	12,58%
0,1	47,91%	12,81%	13,73%
0,2	55,99%	18,01%	21,41%
0,4	65,95%	36,77%	38,69%
0,8	93,69%	70,17%	94,02%
1,2	97,10%	86,55%	98,51%

Ocorre um aumento significativo da recuperação do cromo e do níquel metálicos com o aumento do campo magnético. A recuperação do cromo, foi de 11,33%, para um campo de 0,05 Tesla e 86,55% para o campo 1,2 Tesla. A recuperação do níquel varia de 12,58% até 98,51% para os mesmos campos magnéticos. Observa-se um salto na recuperação destes dois elementos para os campos magnéticos de 0,8 e 1,2 Tesla.

Em relação ao ferro metálico, 47,04% deste é recuperado com o campo de 0,05 T, e para os campos de 0,8 e 1,2 Tesla as recuperações do elemento ferro metálico atingem 93,69% e 97,1% respectivamente.

A importância da recuperação do metal em estado elementar esta diretamente

relacionada com a reutilização do mesmo, pois em estado metálico esse material não necessita de etapas de redução para ser reincorporado ao processo. A Figura 4.5 mostra o aumento da recuperação dos elementos em estado metálico para cada amostra com o aumento do campo magnético aplicado no beneficiamento.

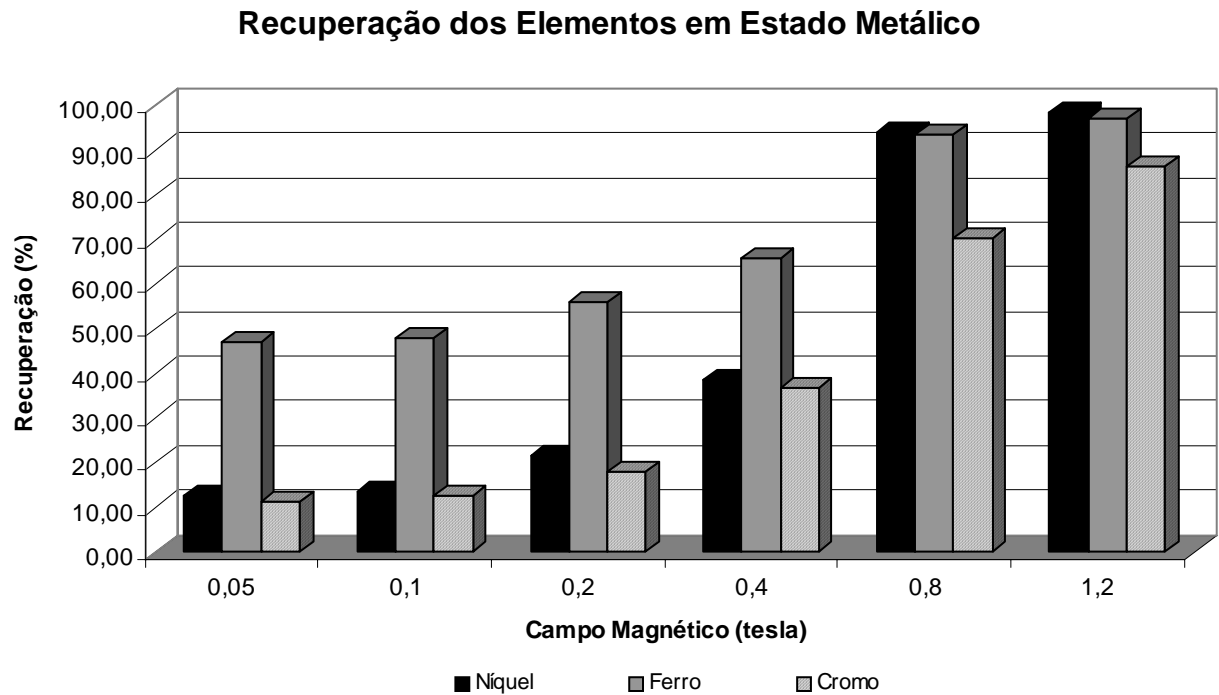


Figura 4.5: Recuperação dos elementos em estado metálico.

4.3 Aplicação de beneficiamentos magnéticos seqüenciais com a diminuição do campo magnético

Esta etapa foi desenvolvida de forma similar a primeira, com a utilização do mesmo equipamento, tendo como principal diferença a alteração dos parâmetros de intensidade de fluxo magnético para se estudar a influência de uma separação de alta intensidade magnética seguida por sucessivos beneficiamentos diminuindo-se a intensidade de fluxo magnético.

Sendo assim, para cada variação da intensidade de fluxo magnético (1,2, 0,8, 0,4 e 0,2 Tesla), a alimentação era o concentrado anterior, da mesma amostra, conforme o fluxograma

da Figura 4.6. Nesta etapa a velocidade de rotação do rolo foi fixada em 40 rpm.

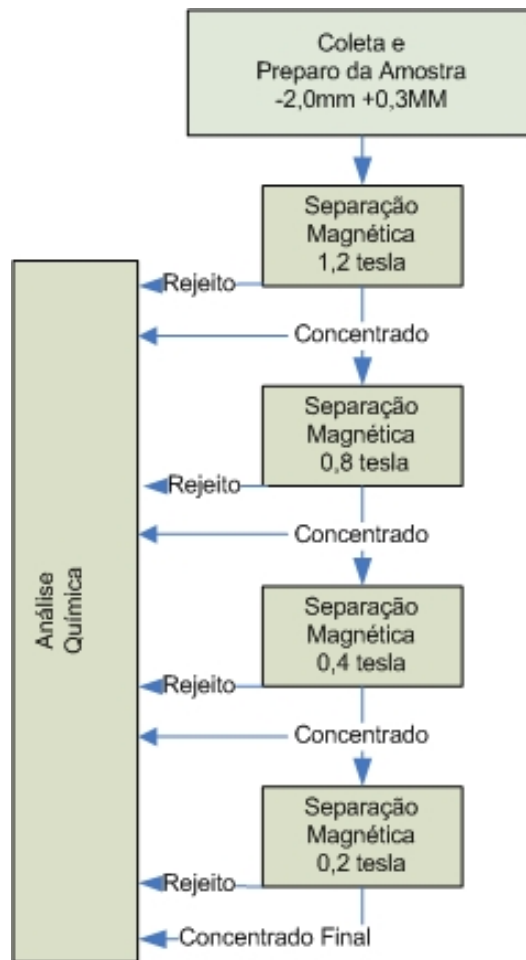


Figura 4.6: Metodologia Separação Magnética Sequencial

Esta metodologia foi desenvolvida com a intenção de se promover um aumento na recuperação dos metais, mantendo uma baixa recuperação mássica total da escória. Outro objetivo desta metodologia é o de, com a aplicação de um campo magnético forte, gerar um primeiro resíduo com o mínimo de ferro, cromo e níquel em sua constituição, e com a aplicação de beneficiamentos magnéticos sucessivos, concentrar de forma mais eficiente e gerar resíduos mistos no decorrer do processo, onde o concentrado e ou cada resíduo podem ser obtidos de acordo com as necessidades da empresa, como por exemplo para ser aplicado nos fornos de redução (Guozhu, 2003; Nakasuga, 2004; Park, 2004), ou ser direcionado para formas alternativas de disposição (Motz 2001; Shi, 2001; Maslehuddin 2003; Shen 2003; Topkaya 2004).

4.3.1 Análise do teor de Fe, Cr e Ni totais para o concentrado magnético e rejeito

Após cada processo uma alíquota do concentrado e uma alíquota do rejeito foram enviadas para análise química objetivando a determinação dos teores de ferro, cromo e níquel. Foram obtidos os seguintes resultados.

Tabela 4.9: Beneficiamento magnético com 1,2 Tesla.

Massa Total 4895g	Concentrado 3695g	Rejeito 1200g
Fe ₂ O ₃	13,52%	1,04%
Cr ₂ O ₃	2,57%	1,17%
NiO	0,36%	0%

Conforme a Tabela 4.9 é possível observar um resíduo com aproximadamente 1% de cromo e ferro e nenhuma presença de níquel. No concentrado podemos observar 13,52% de ferro, 2,57% de cromo e 0,36% de níquel. Demonstrando um pequeno aumento no teor dos três metais, caracterizando assim a concentração dos mesmos, em relação aos teores da alimentação. Porém, como pode ser visualizado na Tabela 4.15 a recuperação mássica do concentrado é de aproximadamente 75%.

Tabela 4.10: Beneficiamento magnético com 0,8 Tesla.

Massa Total 3690g	Concentrado 2860g	Rejeito 830g
Fe ₂ O ₃	16,73%	2,44%
Cr ₂ O ₃	2,79%	1,82%
NiO	0,47%	0%

Na tabela 4.10 se pode observar que o resíduo possui aproximadamente 1,8% de cromo e 2,44% de ferro e nenhuma presença de níquel.

Quando comparadas as Tabelas 4.9 e 4.10 é possível constatar um aumento nos teores de ferro, cromo e níquel. Tal fato ocorre pois, com a redução do campo magnético ocorre a redução da massa do concentrado, devido a menor concentração de materiais pouco magnéticos, como óxidos metálicos inclusos na matriz da escória.

Observando agora as Tabelas 4.11 e 4.12, fica evidente a concentração do ferro, que alcança um teor de aproximadamente 40%, e do níquel, que tem seu teor aumentado em aproximadamente quatro vezes em relação ao concentrado obtido do beneficiamento com 1,2

Tesla de campo magnético.

Tabela 4.11: Beneficiamento magnético com 0,4 Tesla.

Massa Total 2855g	Concentrado 1722g	Rejeito 1133g
Fe ₂ O ₃	26,11%	2,39%
Cr ₂ O ₃	2,79%	2,8%
NiO	0,77%	0%

A Tabela 4.11 demonstra que no concentrado temos agora um teor de 26,11% de ferro, um aumento de quase 10% em relação ao teste anterior. Entretanto, aparece o mesmo teor de 2,79% de cromo e um aumento de 0,47% para 0,77% de níquel.

Tabela 4.12: Beneficiamento magnético com 0,2 Tesla.

Massa Total 1717g	Concentrado 1039g	Rejeito 678g
Fe ₂ O ₃	40,83%	4,04%
Cr ₂ O ₃	2,53%	3,18%
NiO	1,28%	<0,05%

A Tabela 4.12 mostra resultados para o concentrado final, do beneficiamento sequencial. Seu resíduo possui teor de 3,18% de cromo e 4,04% de ferro e menos que 0,05% de níquel. No concentrado tem-se um teor de 40,83% de ferro, 2,53% de cromo e 1,28% de níquel.

Em relação à concentração do cromo, o teor mantém-se constante após o tratamento com 0,8 e 0,4 Tesla, mas reduz no beneficiamento com campo magnético de 0,2 Tesla, mesmo com uma redução significativa da massa em relação ao concentrado anterior. Tal fato demonstra que, devido as suas características magnéticas, os óxidos que contém cromo possivelmente não sofrem influência de um campo magnético inferior a 0,4 Tesla, sendo concentrado abaixo de 0,4 T somente o cromo presente em ligas metálicas, o que confirma o estudo de Sripriya (2005) que com a aplicação de 0,1 Tesla recuperou somente 2% do cromo presente em uma amostra de ferro-cromo. Também deve-se citar o efeito da liberação do material, pois como óxidos contendo cromo, e de baixa susceptibilidade magnética, são normalmente encontrados aderidos a partículas metálicas de maior susceptibilidade magnética pode ocorrer que com o aumento da liberação do material, uma menor quantidade dos materiais contendo cromo seja arrastada juntamente com os materiais magnéticos.

Os resíduos também foram analisados de forma que fosse possível quantificar os teores de ferro, cromo e níquel presentes na massa total do resíduo gerado, para tal os resíduos foram somados e analisados para se determinar o teor dos elementos.

Tabela 4.13: Resíduo total gerado após cada beneficiamento.

Massa Total 4895g	Teor Resíduo		
	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO
1,2 Tesla 1200g	1,04%	1,17%	0%
0,8 Tesla 2030g	1,62%	1,43%	0%
0,4 Tesla 3163g	1,90%	1,91%	0%
0,2 Tesla 3841g	2,28%	2,15%	<0,01%

Nos valores mostrados na Tabela 4.13, pode ser observado que para o montante total do resíduo, à medida que o campo magnético é reduzido, ocorre o aumento da concentração do cromo e ferro no mesmo, atingindo teores de 2,28% e 2,15% para ferro e cromo respectivamente. Tendo o níquel sido detectado apenas no resíduo gerado no processamento com 0,2 Tesla. Desta forma conclui-se que tal método pode representar uma boa alternativa para a recuperação de ferro e níquel, mas não realiza uma limpeza no resíduo de forma eficiente para o cromo ali presente. Porém de acordo com o estudo de Pillay (2003) a quantidade de cromo que pode oxidar ao estado hexavalente é de 0,1 a 1% da quantidade total de cromo, sendo assim, por exemplo, no caso do resíduo total gerado, no máximo 0,02 % da massa do resíduo poderá vir a formar cromo hexavalente valor considerado não prejudicial à saúde pela US-EPA de acordo com Proctor (2000). No caso da norma brasileira simplesmente a presença de “cromo e compostos” confere periculosidade ao resíduo (NBR 10004, 1987)

4.3.2 Análise da recuperação de Fe, Cr e Ni

Analisando os resultados da Tabela 4.14 percebemos as mudanças na recuperação dos elementos ferro, cromo e níquel. Como este método iniciou com um campo magnético relativamente alto de 1,2 T, teve no primeiro beneficiamento um concentrado com uma recuperação de 97,56% do ferro, 87,17% do cromo e 100% para o níquel presente na amostra. Este concentrado foi então submetido novamente a um campo magnético, desta vez com 0,8 Tesla, onde se obteve uma recuperação de 93,6% do ferro, 73,33% do cromo e novamente

100% do níquel na amostra. Com a seqüência do experimento, o novo concentrado, desta vez resultante da aplicação de um campo magnético de 0,4 Tesla, recuperou 88,31% do ferro, 44,27% do cromo e 100% do níquel. Encerrando série de beneficiamentos obteve-se, após a aplicação do campo de 0,2 Tesla ao concentrado anterior, um concentrado final o qual recuperou 82,84% do ferro, 24,11% do cromo e aproximadamente 99,25% do níquel, da escória.

Tabela 4.14: Recuperação total, após cada beneficiamento.

Campo Magnético	Recuperação no Concentrado		
	Fe ₂ O ₃ (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	NiO(%)
1,2 Tesla	97,56	87,17	100
0,8 Tesla	93,6	73,33	100
0,4 Tesla	88,31	44,27	100
0,2 Tesla	82,84	24,11	≅99,25

Quando analisada a recuperação dos metais, observa-se que existe uma queda de aproximadamente 15% na recuperação do ferro entre 1,2 e 0,2 Tesla, e uma queda insignificante de aproximadamente 0,75% na recuperação do níquel entre 0,4 e 0,2 Tesla, porém a recuperação mássica da escória varia, conforme Tabela 4.15, de 75,5% (1,2 T) para 21,4% (0,2 T) confirmando uma boa concentração para esses elementos, pois se obtêm, conforme já mencionado, recuperações de 82,84% e ≅99,25% de ferro e níquel respectivamente, em 21,4% da massa inicial da escória.

Para o cromo, porém, existe uma queda bastante acentuada na recuperação a partir da concentração com campo magnético de 0,4 Tesla, atingindo uma recuperação de somente 24,11% para o concentrado de 0,2 Tesla, contra uma recuperação de 73,33% para o concentrado do procedimento com 0,8 Tesla, o qual representa uma recuperação mássica da alimentação de aproximadamente 58% conforme Tabela 4.15.

Tabela 4.15: Recuperação mássica da escória

Campo Magnético	Massa do Concentra em gramas (% mássica)	Massa do Rejeito Total em gramas (% mássica)
1,2 Tesla	3695 (75,5)	1200 (24,5)
0,8 Tesla	2860 (58,4)	2030 (41,5)
0,4 Tesla	1722 (35,2)	3163 (64,6)
0,2 Tesla	1039 (21,2)	3841 (78,5)

Na Figura 4.7 podemos observar a variação na recuperação dos metais após a realização dos beneficiamentos em seqüência para uma mesma amostra de escória. Fica evidente a queda na recuperação do cromo e a pouca alteração na recuperação do níquel.

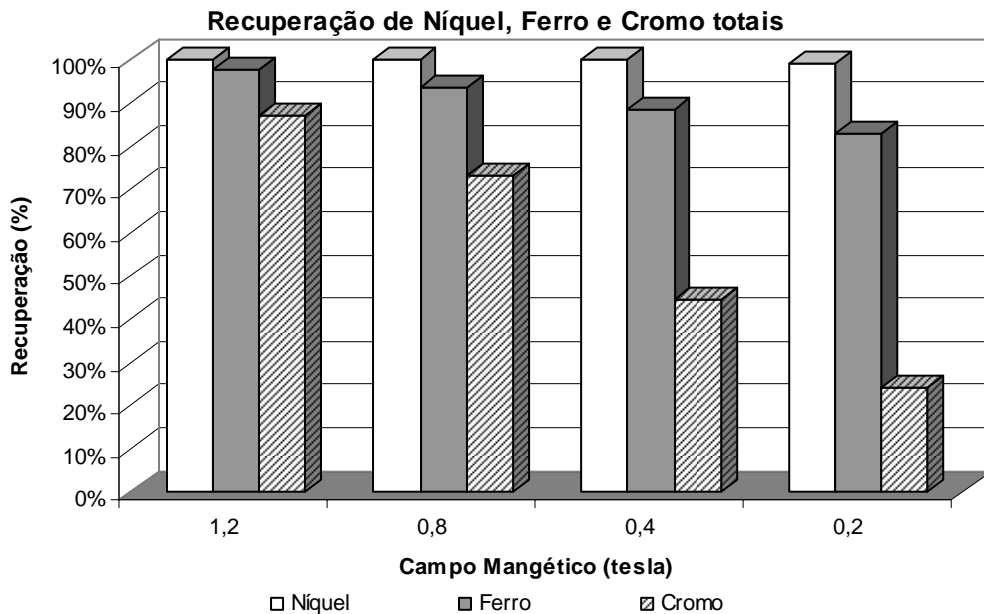


Figura 4.7: Recuperação dos elementos totais

4.3.3 Análise para teor e recuperação de Fe, Cr e Ni metálicos

Nesta etapa foi observada a influência das concentrações sucessivas com intensidade magnética decrescente para os elementos ferro, cromo e níquel em estado metálico.

Tabela 4.17: Teor de elementos em estado metálicos

	Fe	Cr	Ni
1,2T (3695g)	3,63%	0,82%	0,35%
0,8T (2865g)	4,48%	0,82%	0,46%
0,4T (1732g)	7,17%	0,72%	0,69%
0,2T (1039g)	11,1%	0,61%	1,25%

Após a realização das análises pode se observar, Tabela 4.17, o aumento significativo do teor do ferro e do níquel, e uma redução no teor do cromo para o concentrado final. Onde

para o elemento ferro em estado metálico os teores foram de 3,63%, 4,48%, 7,17% e 11,1% (como Fe_2O_3) para os campos de 1,2, 0,8, 0,4 e 0,2 Tesla. Para o metal níquel os teores foram de 0,35%, 0,46%, 0,69%, 1,25% (como NiO) para os mesmos campos magnéticos, demonstrando nesta fase que praticamente todo o níquel recuperado é em estado metálico. O cromo por sua vez apresentou teores de 0,82%, 0,82%, 0,72% e 0,61% (como Cr_2O_3) para os campos de 1,2, 0,8, 0,4 e 0,2 Tesla respectivamente.

Mas é na recuperação dos metais, Tabela 4.18, que essa diferença se mostra mais claramente. Para o ferro ocorre uma recuperação de mais de 85% do total metálico e para o níquel aproximadamente 99% do metal é recuperado, com uma recuperação mássica da escória de 21,4%. Já para o cromo a recuperação é muito baixa para o concentrado final da seqüência (0,2 Tesla), porém possui uma recuperação de quase 70% no concentrado intermediário resultante do beneficiamento com 0,8 Tesla, tendo em vista que a recuperação mássica total da escória para o campo magnético de 0,8 Tesla é de aproximadamente 58,4%.

Tabela 4.18: Recuperação dos elementos metálicos

Campo Magnético	Fe	Cr	Ni
1,2Tesla	99.91%	88.72%	100%
0,8Tesla	95.40%	68.73%	100%
0,4Tesla	92.37%	36.76%	100%
0,2Tesla	85.82%	18.63%	98.96%

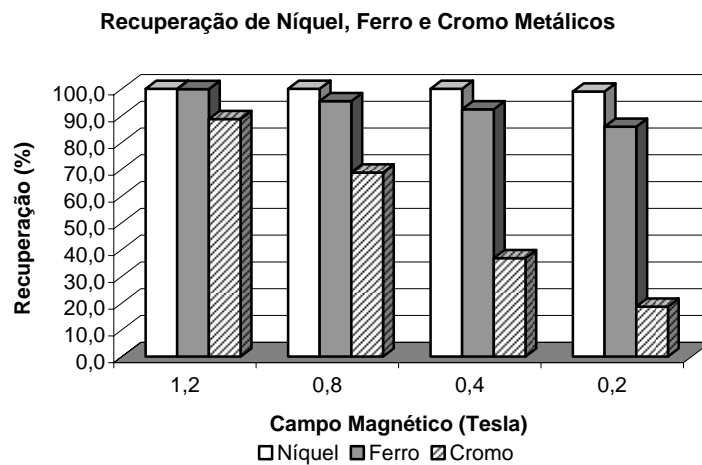


Figura 4.8: Recuperação dos elementos em estado metálico.

A Figura 4.8 mostra claramente a variação da recuperação dos elementos metálicos após cada etapa do beneficiamento magnético seqüencial. Pode-se observar a queda na recuperação do cromo e a pouca alteração na recuperação do ferro e do níquel metálicos.

4.4 Beneficiamento magnético com equipamentos industriais em escala laboratorial

Esta etapa foi desenvolvida a fim de simular o beneficiamento com a utilização de equipamentos industriais com características similares aos encontrados em plantas de beneficiamento magnético, porém em escala laboratorial. O procedimento foi constituído de dois beneficiamentos magnéticos em seqüência, sendo o primeiro com o separador de alta intensidade (correia), resultando em um resíduo não magnético, e um concentrado magnético, o qual foi submetido ao segundo beneficiamento, realizado com o rolo magnético de baixa intensidade. Gerou-se assim um concentrado final e um resíduo intermediário. Para critério de cálculo de recuperação mássica, após a análise dos resíduos, os mesmos foram somados gerando apenas um resíduo final.

A partir da Tabela 4.19 pode-se observar que após a concentração com o equipamento de alta intensidade magnética o resíduo gerado não contém mais de 0,55% de ferro, 0,44% de cromo e de 0,05% de níquel, sendo que os percentuais expressam concentração de óxidos dos metais. E o concentrado atinge valores de 11,06%, 2,77% e 0,27% para teores de ferro, cromo e níquel respectivamente. Tais valores não representam uma eficaz concentração pelo fato do concentrado conter, conforme Tabela 4.20, aproximadamente 94% da massa total da escória processada.

Tabela 4.19: Teor de metais nos concentrados e resíduos gerados.

Amostras:	Teor de		
	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO
Rejeito, alta intensidade (correia)	0.55%	0.44%	< 0.05%
Concentrado, alta intensidade (correia)	11.06%	2.77%	0.27%
Rejeito, baixa intensidade (rolo)	4.1%	2.58%	0.11%
Concentrado, baixa intensidade (rolo)	29.16%	3.29%	0.69%

Porém, quando se submete este concentrado ao beneficiamento magnético de menor intensidade, rolo magnético, se obtém uma recuperação mássica de aproximadamente 26%

(Tabela 4.20), com teores de 29,16%, 3,29 e 0,69% para ferro, cromo e níquel respectivamente e recuperações de 72,99%, 32,56% e 40% para os mesmos elementos de acordo com os dados da Tabela 4.21..

Tabela 4.20: Recuperação mássica da escória beneficiada.

Alimentação 48000g	Massa do Concentrado	Massa do Rejeito
Alta intensidade Correia	45000g (93,75%)	3000g (6,25%)
Baixa intensidade Rolo	12500g (26,04)	32500g (67,71%) (35500g – 73,96%)

Tabela 4.21: Recuperação dos metais totais nos concentrados.

	Fe₂O₃	Cr₂O₃	NiO
Alta intensidade (correia)	99,66%	98,70%	98%
Baixa intensidade (rolo)	72,99%	32,56%	69%

Quando analisado o teor dos elementos metálicos concentrados, Tabela 4.22, tem-se no resíduo gerado, após o beneficiamento com campo magnético de alta intensidade, não mais que 0,31% de cromo, 0,05% de níquel e praticamente 0% de ferro em estado metálico. O concentrado de alta intensidade possui 2,88%, 0,76% e 0,23% de ferro, de cromo e de níquel metálicos, respectivamente. O concentrado final, após o tratamento com o rolo magnético, possui 8,7% de ferro metálico, 0,47% de cromo metálico e 0,61% de níquel metálico e seu resíduo 0,64% de ferro, 0,87% de cromo e 0,09% de níquel, todos em estado metálico. Sendo assim percebe-se o aumento da concentração para o ferro e para o níquel no concentrado final, e uma maior concentração do cromo no resíduo gerado pela concentração por rolo magnético de baixa intensidade.

Tabela 4.22: Teor de elementos em estado metálico.

Amostras:	Teor de		
	Fe	Cr	Ni
Rejeito, alta intensidade (correia)	≅ 0%	0,31%	< 0,05%
Concentrado, alta intensidade (correia)	2,88%	0,76%	0,23%
Rejeito, baixa intensidade (rolo)	0,64%	0,87%	0,09%
Concentrado, baixa intensidade (rolo)	8,7%	0,47%	0,61%

Tendo em vista a recuperação dos materiais metálicos podemos observar, de acordo com a Tabela 4.23, que após os dois beneficiamentos se obtém uma recuperação de

aproximadamente 84% e 71% do ferro e do níquel metálicos respectivamente, porém para o cromo a recuperação não se mostra representativa atingindo não mais que 17%. Comprovando que para uma redução significativa no teor do cromo presente na escória de aço inoxidável deve-se utilizar um campo magnético bastante alto, o que prejudicaria a recuperação mássica não fornecendo uma boa concentração.

Tabela 4.23: Recuperação dos elementos metálicos.

	Fe	Cr	Ni
Alta intensidade (correia)	100%	97,49%	96,86%
Baixa intensidade (rolo)	83,94%	16,75%	70,86%

4.5 Comparativo entre as técnicas

Tomando-se alguns resultados anteriores pode-se observar os teores dos metais, a recuperação dos mesmos e a recuperação mássica da escória, de forma a comparar os métodos. Os critérios para a seleção dos resultados foram: a recuperação do metal em relação à recuperação mássica da escória, valores similares de campo magnético porém sob diferentes circunstâncias – como beneficiamento simples a 0,4 Tesla e seqüencial com 1,2, 0,8 e 0,4 Tesla, ou beneficiamento simples a 0,2 Tesla e os beneficiamentos seqüenciais de 1,2, 0,8, 0,4 e 0,2 Tesla e nos equipamentos industriais com 1,5 e 0,15 Tesla. Os beneficiamentos magnéticos simples e seqüenciais, com os campos magnéticos de 1,2 e 0,8 Tesla, geraram resultados bastante similares, sendo assim não serão comparados entre si, mas serão citados devido às altas recuperações obtidas com a aplicação destes campos magnéticos. Para estes dois campos magnéticos é perceptível a alta taxa de recuperação dos metais, porém um baixo volume de rejeito. Sendo assim, podem ser adotados para uma limpeza de aproximadamente 20% do resíduo e posterior beneficiamento ou uso do concentrado magnético, dependendo das necessidades do processo industrial.

4.5.1 Concentração de Ferro

Observa-se na Tabela 4.24 que o ferro, no momento em que sofre sucessivas concentrações magnéticas, no caso 1,2, 0,8 0,4 Tesla, tende a uma maior recuperação quando comparado com um beneficiamento simples de 0,4 Tesla, sendo de 88,31% para o

beneficiamento seqüencial e de 63,78% para o beneficiamento simples. Quando comparados os campos magnéticos mais baixos, pode-se perceber que, mesmo com um campo um pouco inferior a 0,2 Tesla, o concentrado obtido pelo rolo de magneto permanente possui uma recuperação mássica maior, e assim conseqüentemente uma recuperação do metal, também mais alta. Porém, o concentrado gerado após as concentrações com 1,2, 0,8, 0,4 e 0,2 Tesla forneceu uma recuperação e um teor bastante altos com uma recuperação mássica intermediária quando comparada com as outras técnicas, demonstrando uma boa concentração do elemento ferro.

Tabela 4.24: Comparativo das técnicas para a concentração do Ferro

Concentrado após beneficiamento por:	Teor de Fe₂O₃	Recuperação (Fe₂O₃)	Recuperação Mássica
0,2T rolo induzido (40rpm)	30,05%	51,78%	16,27%
0,4T rolo Induzido (40rpm)	21,02%	63,78%	29,38%
1,2 T rolo induzido	13,52%	97,56%	75,5%
1,2T e 0,8T rolo induzido	16,73%	93,6%	58,4%
1,2T e 0,8T e 0,4T rolo induzido.	26,11%	88,31%	35,2%
1,2T e 0,8T, 0,4 e 0,2T rolo induzido.	40,83%	82,84%	21,2%
1,5T correia e 0,15T rolo, magnetos permanentes	29,16%	72,99%	26,04%

Sendo assim, se a necessidade é de um concentrado com alto teor de ferro deve-se optar pelo beneficiamento contínuo decrescente até 0,2 Tesla, como também pode ser observado na figura 4.9, mas se o objetivo é a geração de um resíduo com menor teor possível deste elemento, pode-se optar pelos beneficiamentos seqüenciais, porém realizando o processo apenas até 0,8 Tesla.

Estes aumentos na concentração com a aplicação de beneficiamentos magnéticos seqüenciais se devem possivelmente à magnetização dos compostos que contém metais ou óxidos metálicos os quais sofrem assim uma alteração na sua susceptibilidade magnética (Halliday, 1993). Pode-se observar na figura 4.9 a diferença entre a recuperação mássica total e a recuperação mássica do ferro, confirmando que através do beneficiamento magnético é possível realizar a concentração dos materiais ferrosos contidos na escória entre 2 e 0,3 milímetros visando sua reutilização no processo de aciaria. Também pode ser observado o aumento no teor e da concentração.

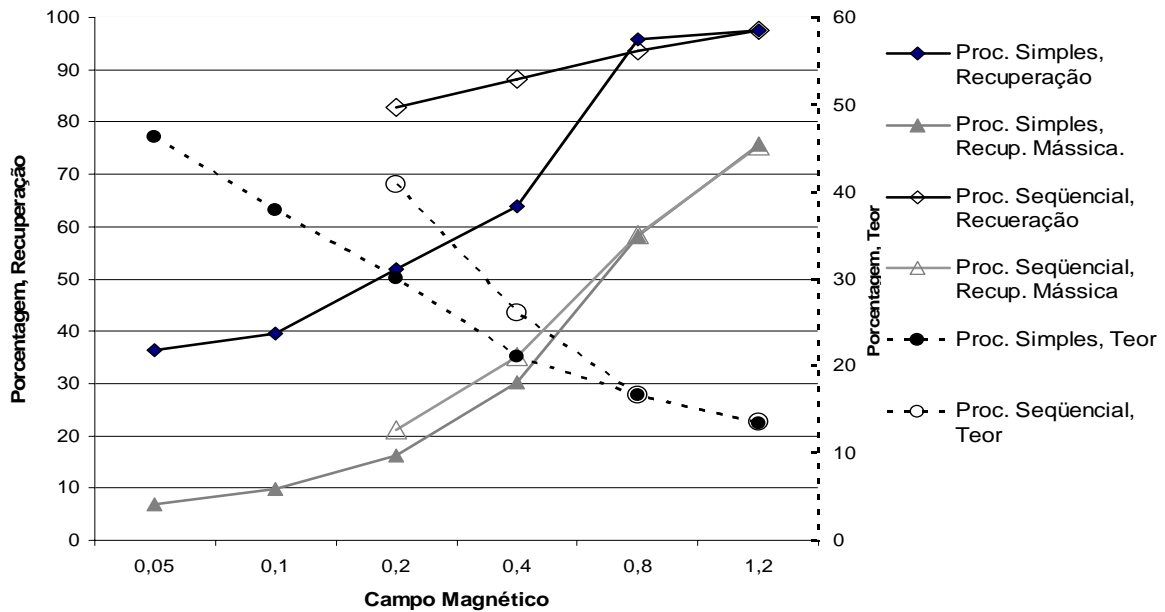


Figura 4.9: Comparativo entre o beneficiamento seqüencial e o simples para o elemento ferro.

4.5.2 Concentração de Cromo

Em relação à concentração do Cromo é possível verificar, na Tabela 4.25, e na figura 4.10 que também há um aumento na recuperação do metal quando os beneficiamentos seqüenciais foram empregados, fato que está diretamente relacionado com o aumento da recuperação mássica total da escória e não necessariamente com um real aumento na concentração do mesmo metal. Percebe-se, por exemplo, que no beneficiamento seqüencial de 1,2, 0,8 e 0,4 Tesla ocorre uma melhora na concentração do metal, pois este mantém o mesmo teor, de 2,79%. Tendo reduzido a recuperação mássica da escória de 58,4%, com o beneficiamento de 1,2 e 0,8 Tesla seqüenciais, para 35,2%, quando beneficiado seqüencialmente para os campos magnéticos de 1,2, 0,8 e 0,4 Tesla. Quando aplicada a separação magnético somente com 1,2 Tesla se obtém um concentrado com uma recuperação mássica de 75,5%, porém se obtém uma recuperação de 87,17% do cromo total da amostra.

Quando observado o concentrado do beneficiamento seqüencial com os equipamentos de magnetos permanentes de alta e baixa intensidade, correia e rolo respectivamente, pode-se perceber uma semelhança com o concentrado magnético obtido após o beneficiamento simples com 0,4 Tesla, com teores de 3,52%, para o beneficiamento simples com 0,4 Tesla, e de 3,29% para o beneficiamento seqüencial realizado com os equipamentos industriais. Ainda

podemos perceber que as recuperações mássicas também são similares. Tendo em vista os resultados obtidos, conclui-se que os beneficiamentos magnéticos testados podem fornecer uma diminuição da presença do cromo na escória, porém somente quando uma recuperação mássica acima de 70% for aceitável ao processo.

Tabela 4.25: Comparativo das técnicas para a concentração do Cromo

Concentrado após beneficiamento por:	Teor de Cr_2O_3	Recuperação do Metal (Cr_2O_3)	Recuperação Mássica
0,2T rolo induzido (40rpm)	2,69%	16,43%	16,27%
0,4T rolo Induzido (40rpm)	3,52%	37,37%	29,38%
1,2 T rolo induzido	2,57%	87,17%	75,5%
1,2T e 0,8T rolo induzido.	2,79%	73,33%	58,4%
1,2T e 0,8T e 0,4T rolo induzido.	2,79%	44,27%	35,2%
1,2T e 0,8T, 0,4 e 0,2T rolo induzido.	2,53%	24,11%	21,2%
1,5T correia e 0,15T rolo, magnetos permanentes	3,29%	32,56%	26,04%

A proximidade das recuperações, mássicas da escória e do elemento, confirma uma fraca concentração do cromo perante o beneficiamento magnético. Fato que pode estar associado a cristalografia do material e a liberação dos elementos contendo cromo os quais, quando não ligados à elementos contendo ferro, acabam não sofrendo a ação de um campo magético.

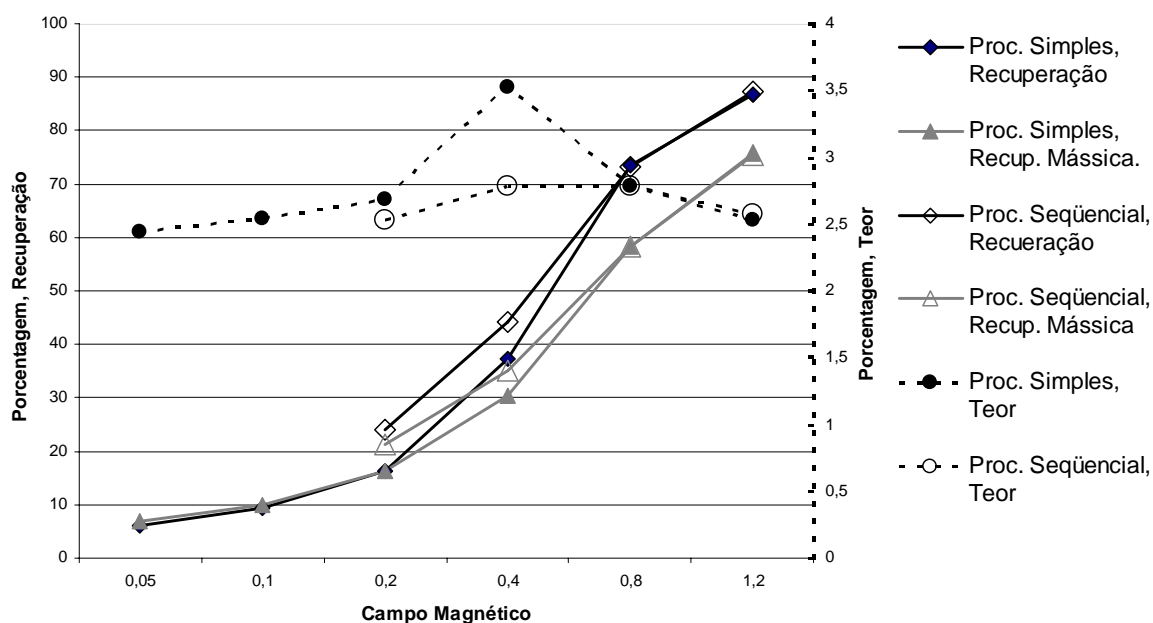


Figura 4.10: Comparativo entre o beneficiamento sequencial e o simples para o elemento cromo.

4.5.3 Concentração de Níquel

Apesar de ser encontrado em teores muito baixos na escória de aço inox, o níquel apresentou uma boa concentração quando a escória foi submetida aos beneficiamentos seqüenciais de 1,2, 0,8, 0,4 e 0,2 Tesla, resultando em um concentrado com 1,28% de níquel (porcentagem de NiO) com uma recuperação de 99,25% do níquel total em uma recuperação mássica de apenas 21,2% do total da massa de escoria beneficiada como pode ser verificado na tabela 4.26 e na figura 4.11. Quando observadas as técnicas pode-se perceber que o níquel possui um comportamento similar ao do ferro. Salvo a diferença de teor, o efeito dos beneficiamentos seqüenciais é semelhante resultando em um concentrado com maior teor e maior recuperação em relação às outras técnicas. Fato que ocorre devido às semelhantes características magnéticas destes dois metais.

Tabela 4.26: Comparativo das técnicas para a concentração do Níquel

Concentrado após beneficiamento por:	Teor de NiO	Recuperação do Metal (NiO)	Recuperação Mássica
0,2T rolo induzido (40rpm)	0,32%	26,79%	16,27%
0,4T rolo Induzido (40rpm)	0,29%	49,18%	29,38%
1,2T e 0,8T rolo induzido.	0,47%	100%	58,4%
1,2T e 0,8T e 0,4T rolo induzido.	0,77%	100%	35,2%
1,2T e 0,8T, 0,4 e 0,2T rolo induzido.	1,28%	≅ 99,25%	21,2%
1,5T correia e 0,15T rolo, ambos com magneto permanente	0,40%	40%	26,04%

É possível perceber a variação em relação à recuperação do elemento níquel e da recuperação total da escória, o que caracteriza uma melhora significativa na concentração deste material.

Sendo assim, conclui-se que o beneficiamento magnético corretamente aplicado pode resultar em uma ótima recuperação, de até 100% para o metal níquel, o qual pode ser destinado dependendo das necessidades da empresa.

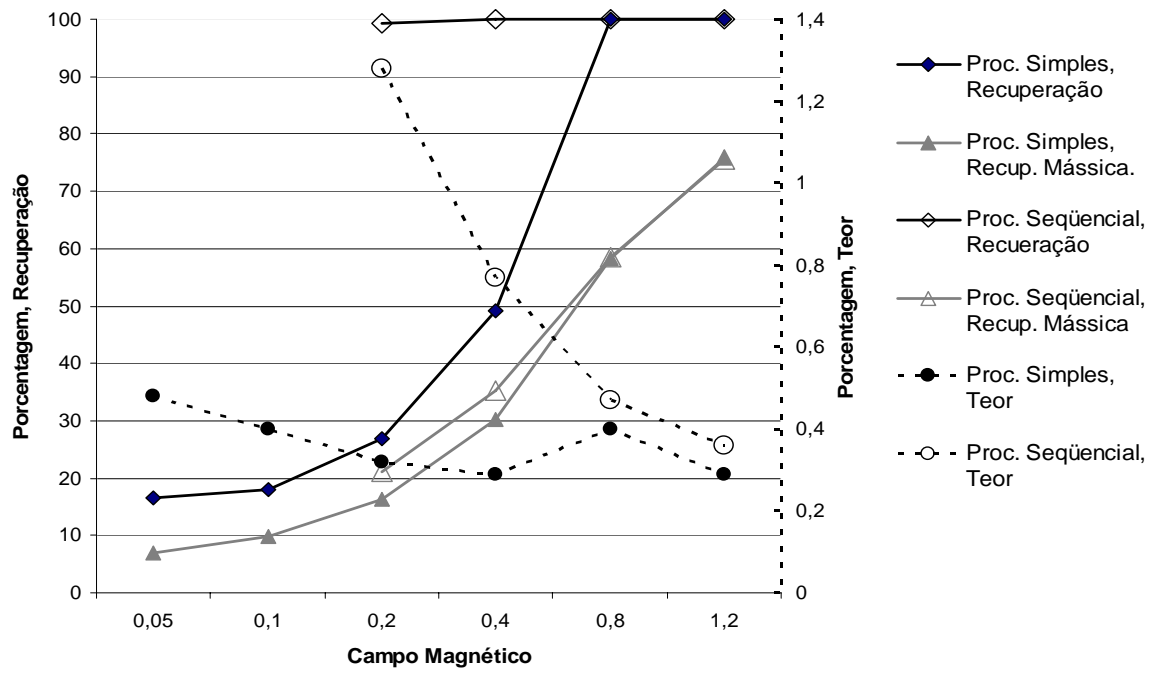


Figura 4.11: Comparativo entre o beneficiamento seqüencial e o simples para o elemento níquel.

5 CONCLUSÕES

O objetivo do trabalho de estudar o beneficiamento magnético a seco para escória de aço inoxidável, entre 2 e 0,3 milímetros, visando comprovar a tese de que beneficiamentos sequenciais podem aumentar a concentração/recuperação dos elementos ferro, cromo e níquel presentes na escória nesta granulometria, foi concluído com êxito.

Quanto ao efeito causado pela alteração de parâmetros operacionais pode-se observar que a alteração da velocidade de beneficiamento não ocasiona uma significativa modificação na concentração, mas sim na recuperação dos metais, devido á alteração da massa da escória recuperada. Desta forma, para o metal cromo, a velocidade de 40 rpm apresentou um aumento na concentração do metal, corroborando com o conceito de Schubert (1978) de que o arraste de compostos de menor susceptibilidade magnética pode ocorrer com a aplicação de uma maior velocidade de rotação do rolo, pois assim a amostra possui um tempo menor para que partículas menos magnéticas sofram a ação de forças competitivas como a da gravidade.

Com relação à intensidade do campo magnético, o aumento desta está diretamente relacionado com o aumento da recuperação dos metais, mas também confere ao concentrado uma menor concentração/teor corroborando com Schubert (1978) e Luz (2004). Porém, no momento em que é aplicada em seqüência decrescente, confirma a hipótese deste trabalho e acarreta em uma separação mais eficiente (maior concentração/recuperação) para o ferro e o níquel, aumentando a recuperação de ferro de 51,78% (concentrado com teor de 30% de Fe_2O_3) para 82,84% (concentrado com teor de 40,8% de Fe_2O_3), e de níquel 26,79% (concentrado com teor de 0,32% de NiO) para praticamente 100% (concentrado com teor de 1,28% de NiO), quando comparados os resultados de beneficiamento magnético simples de 0,2 Tesla (recuperação mássica de 16,3% da escória) com o beneficiamento sequencial de 1,2

a 0,2 Tesla (recuperação mássica de 21,2% da escória). O beneficiamento seqüencial ainda gera mistos intermediários, com teores de até 3,2% de cromo (Cr_2O_3), os quais podem ser destinados a outros processos de tratamento.

Sendo assim, através do beneficiamento magnético seqüencial a seco, é possível realizar a concentração dos materiais ferrosos contidos na escória fina (entre 2 e 0,3 milímetros), visando, por exemplo, sua (re)utilização no processo de aciaria, pois foram obtidos concentrados magnéticos com recuperações maiores de 80% para ferro e de aproximadamente 100% para níquel, com boas recuperações mássicas da escória.

Porém, maiores esforços se fazem necessários para uma melhor retirada do cromo do resíduo. A recuperação do cromo atingiu até aproximadamente 87%, porém com uma recuperação mássica de 75% da escória. Quando comparados os resultados de beneficiamento magnético simples de 0,2 Tesla (recuperação mássica de 16,3% da escória) com o beneficiamento seqüencial de 1,2 a 0,2 Tesla (recuperação mássica de 21,2% da escória) a recuperação do cromo variou de 16,4% (teor de 2,7% de Cr_2O_3) para 24,1% (teor de 2,5% de Cr_2O_3) respectivamente demonstrando uma pequena melhora na concentração, e assim caracterizando o beneficiamento magnético como não eficiente para a concentração e retirada do cromo da escória de aço inoxidável.

O cruzamento de técnicas pode ser considerado como sugestão, para trabalhos futuros, como, por exemplo, a utilização de concentração gravimétrica dos resíduos não magnéticos, após a concentração dos materiais magnéticos com a finalidade de se concentrar os óxidos de cromo e partículas de cromo metálicas não magneticamente removíveis.

REFERÊNCIAS

- ALANYALI, H. et al. **Application of magnetic separation to steelmaking slags for reclamation.** Waste Management 2006, Volume 26, páginas 1133-1139. Publicado por Elsevier Science Ltd. Grã Bretanha.
- ALTUN, I.A. et al. **Study on steel furnace slags with high MgO as additive in Portland cement.** Cement and Concrete Research 2002, volume 32, páginas 1247-1249 – Pergamon;
- ARAUJO, A. L. **Manual de Siderurgia – Produção.** São Paulo: Editora Arte & Ciência, 1997 V.1
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos Sólidos:** Classificação: NBR 10004. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Amostragem de Resíduos:** Procedimento: NBR 10007. Rio de Janeiro, 1987.
- AUGUSTO, P.A. et al. **Magnetic Classification.** Minerals Engineering 2002, Volume 15: páginas 35-43. Publicado por Elsevier Science Ltd. Grã Bretanha.
- BRONKALA W. J. **Magnetic Separation.** Mineral Processing Plant Design 2ª Edição, Capítulo 22, páginas 467-478. Publicado por Society of Mining Engineers, New York.
- CERVO, A.; BERVIAN, P. **Metodologia Científica.** 5. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2002
- GEISELER, J. **Use of Steel Works Slag in Europe.** Waste Management 1996, Volume 16, nºs 1-3, páginas 59-63. Publicado por Elsevier Science Ltd. Grã Bretanha.
- GOTTARDI, R; MIARI, S. **Innovation for the EAF process.** Steel Times International 2002; Volume 26, nº05
- GUOZHU, Y; et al. **Reduction of steel-making slags for recovery of valuable metals and oxides materials.** Scandinavian Journal of Metallurgy 2003, volume 32, páginas 7-14.
- HALLIDAY, RESNICK e WALKER. **Fundamentos de Física,** volume 3, quarta edição. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1993.
- ITOH, T.; et al. **Equilibrium between dissolved chromium and oxygen in liquid high chromium alloyed steel saturated with pure Cr₂O₃.** ISIJ International 2000, volume 40,

páginas 1051-1058.

JANSSON, A; et al. **Slag formation and its role in the ferrochromium production.** Scandinavian Journal of Metallurgy 2002; Volume 31: páginas 314-320. Impresso na Dinamarca.

KAWATRA, S.K.; et al. **Pelletizing steel mill desulphurization slag.** International Journal of Mineral Processing 2002, volume 65, páginas 165-175 – Elsevier.

KUDRIN, V.A. **Steelmaking.** 1985, páginas 359, Moscow: Mir Publishers,.

LEE, F. T.; LEE, C. H. **Study on the reduction behavior of FeO in EAF slag.** Steel Times International. páginas 20-25, Jan. 1995.

LUXAAN, M.P. at al. **Characteristics of slags produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace.** Cement and Concrete Research 2000, volume 30, páginas 517-519 – Pergamon.

LUZ, Adão Benvindo da.; SAMPAIO, João Alves.; ALMEIDA, Salvador Luiz Matos de. **Tratamento de minérios.** 4.ed. Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 2004. 858 p.

MASHANYARE, H; e GUEST, R. **The recovery of ferrochrome from slag at Zimasco.** Minerals Engineering 1997; Volume 10: n° 11, páginas 1253-1258. Elsevier

MASLEHUDDIN, M. et al. **Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes.** Construction and Building Materials, Volume 17, Issue 2, March 2003, páginas 105-112 – Elsevier

MOTZ, H.; GEISELER, J. **Products of steel slags an opportunity to save natural resources.** Waste Management 2001, volume 21, páginas 285-293 – Elsevier

MONSHI, A.; et al. **Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone.** Cement and Concrete Research 1999, volume 29, páginas 1373-1377 – Pergamon.

MURPHY, J. N.; et al. **Enhancement of the Cementitious Properties of Steelmaking Slags.** Canadian Metallurgical Quaterly 1997, Volume 36: n° 5, páginas 315-331. Publicado por Elsevier Science Ltd. Grã Bretanha.

NAKASUGA, T; et al. **Recovery rate of chromium from stainless slag by Iron Melts.** ISIJ International 2004, volume 44, páginas 665-672.

PILLAY, K. et al. **Ageing of chromium(III)-bearing slag and its relation to the atmospheric oxidation of solid chromium(III)-oxide in the presence of calcium oxide.** Chemosphere 2003, volume 52, páginas 1771-1779 – Pergamon.

PARK, J. H.; et al. **Reduction of EAF slags containing Cr₂O₃ using Aluminum at 1973 K.** ISIJ International 2004, volume 44, páginas 790-794.

PROCTOR, D. M.; et al. **Physical and Chemical Characteristics of Blast Furnace, Basic Oxygen Furnace, and Electric Arc Furnace Steel Industry Slags.** Environmental Science

& Technology 2000, Volume 34: n° 8, páginas 1576-1582. Publicado por American Chemical Society, USA.

SCHUBERT H. **Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe**. Band II. 1978, páginas 491 – VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig

SELLTIZ, C. et al. **Métodos de pesquisa nas relações sociais**. São Paulo: Editora Universidade de São Paulo, 1974.

SHI, C. **Characteristics and cementitious properties of ladle slags fines from steel production**. Cement and Concrete Research 2002, volume 32, páginas 459-462 – Pergamon.

SHEN, H., FORSSBERG E. **An overview of recovery of metals from slags**. Waste Management, Volume 23, Issue 10, 2003, páginas 933-949 – Pergamon.

SHEN H., et al. **Physicochemical and Mineralogical Properties of Stainless Steel Slags Oriented to Metal Recovery**. Resources, Conservation & Recycling 2003, Volume 40, Issue 3, 2004, páginas 145-271 – Elsevier.

SHEN LI, Y.S. **The use of waste basic oxygen furnace slag and hydrogen peroxide to degrade 4-chlorophenol**. Waste Management 1999, volume 19, páginas 495-502 – Elsevier.

SILVA, F. G. Dissertação de Mestrado - **Caracterização para o beneficiamento gravimétrico de escória de aço inoxidável com a utilização de concentrador Mozley laboratorial**. 2004. PPGEM – UFRGS.

Slag Atlas. 1995, páginas 616, Verlag Stahleisen GmbH. 2ª edição, Düsseldorf: VDEh.

SRIPRIYA R., MURTY Ch. V.G.K.; **Recovery of metal from slag/mixed metal generated in ferroalloy plants—a case study**. International Journal of Mineral Processing, Volume 75, Issues 1-2, 6 January 2005, páginas 123-134 - Elsevier

STRADLING, A. W.; **The physics of open-gradient dry magnetic separation**. International Journal of Mineral Processing 1993, volume 39, páginas 1-18 – Elsevier.

SVOBODA, J. et al. **Recent developments in magnetic methods of material separation**. Minerals Engineering 2003, Volume 16: páginas 785-792 – Elsevier.

TOPKAYA Y.; et al: **Slag treatment at Kardemir integrated iron and steel works**. International Journal of Mineral Processing 2004, Volume 74, páginas 31-39 – Elsevier.

TUFEKCI, M. et al. **Evaluation of steel furnace slags as cement additives**. Cement and Concrete Research 1997, volume 27, páginas 1713-1717 – Pergamon.

TURKDOGAN, E. T. **Fundamentals of Steelmaking**. 1996, páginas 331, London: The Institute of Materials.

WILSON M. P. et al. **Application of electric spark generated high power ultrasound to recover ferrous and non-ferrous metals from slag waste**. Minerals Engineering 2006, volume 19, páginas 491-499 – Elsevier.

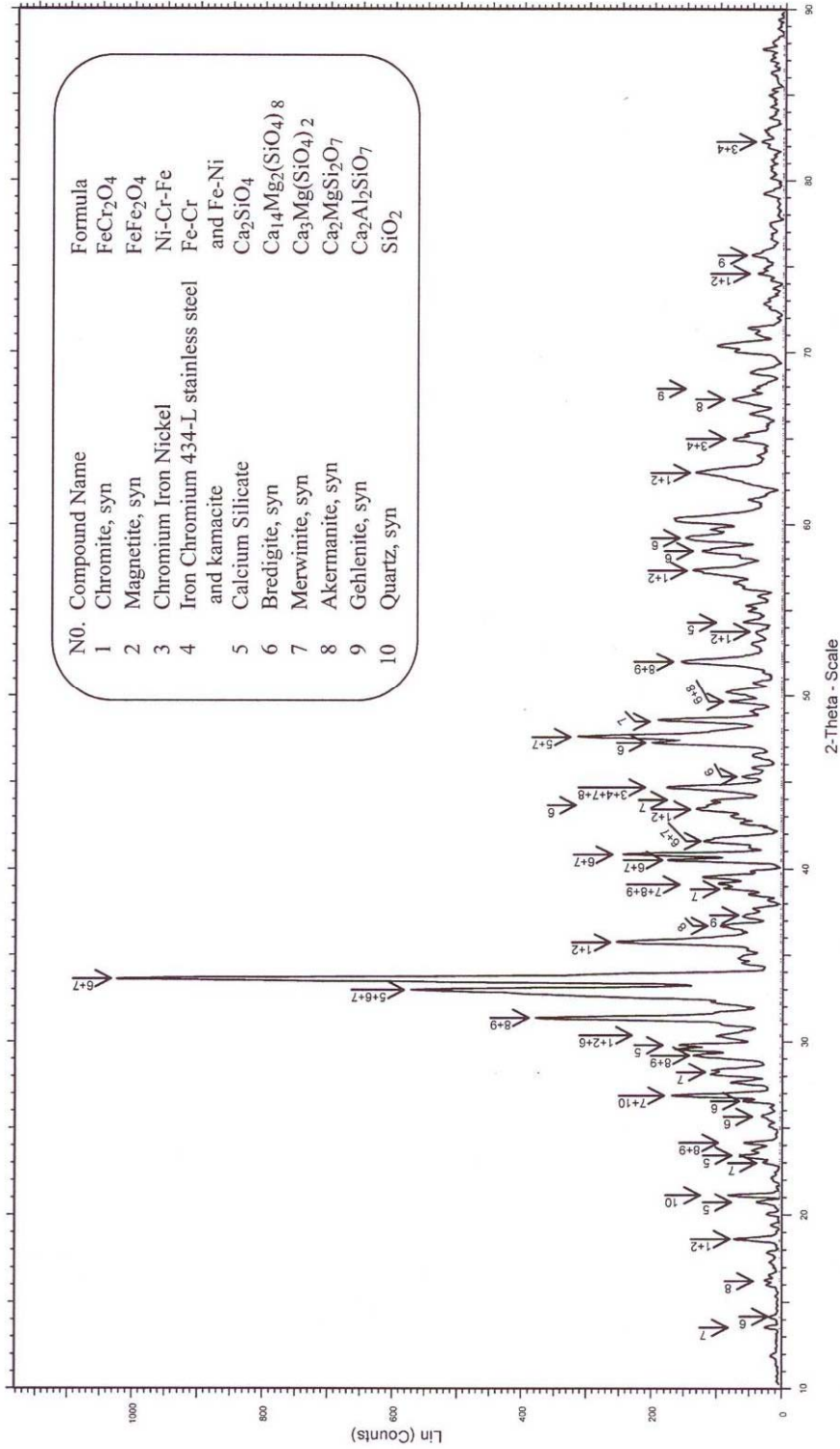
VILELA, A. C. F., et al. **Stainless and Carbon Steel Slag Recycling: Characterization and Forms of Reuse**. Second Japan-Brazil Symposium On Dust Processing – Energy Environment in Metallurgical Industries, Outubro 2000. Universidade de Tohoku – Senoai – Japan, Universidade de São Paulo – Brasil.

XUEQUAN, W. et al. **Study on steel slag and fly ash composite Portland cement**. Cement and Concrete Research 1999, volume 29, páginas 1103-1106 – Pergamon.

Zetterman, L. F. **Caracterização da escória de aço inoxidável com vistas a seu reaproveitamento no processo de produção do aço**. Porto Alegre, 2001. 68p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais PPGEM.

ANEXO A

H. Shen et al. / Resources, Conservation and Recycling 40 (2004) 245–271



Anexo A: Difração de raios-X de escória de aço inoxidável (Shen, 2004)