EDUARDO JUNCA

ESTUDO DA SEPARAÇÃO E APROVEITAMENTO DA PARTE METÁLICA E DOS ÓXIDOS PRESENTES NO RESÍDUO GERADO NO CORTE DE ROCHAS ORNAMENTAIS

São Paulo
2009

EDUARDO JUNCA

ESTUDO DA SEPARAÇÃO E APROVEITAMENTO DA PARTE METÁLICA E DOS ÓXIDOS PRESENTES NO RESÍDUO GERADO NO CORTE DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração:
Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientador:
Prof. Dr. Jorge Alberto Soares Tenório

São Paulo
2009

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

São Paulo, de dezembro de 2009.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Junca, Eduardo
Estudo da separação e aproveitamento da parte metálica e dos óxidos presentes no resíduo gerado no corte de rochas ornamentais / E. Junca. -- ed.rev. -- São Paulo, 2009.
88 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1. Rochas ornamentais 2. Tratamento de resíduos sólidos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II. t.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por todas as oportunidades concedidas.

Aos meus pais Sérgio e Delza, e minha irmã Danúbia, pelo incentivo em todos os momentos da minha vida, sendo eles fáceis ou difíceis.

Ao meu orientador Prof. Dr. Jorge Alberto Soares Tenório, pela oportunidade oferecida para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Dr. Carlos Hoffmann Sampaio e a professora Dra. Denise Crocce Romano Espinosa por aceitarem o convite para avaliação deste trabalho, e pela disponibilidade e interesse para melhorar o conteúdo do mesmo.

Ao professor Dr. Arthur Pinto Chaves pela participação da banca de qualificação e pelas dicas sugeridas que contribuíram para o enriquecimento deste trabalho.

Ao Professor Dr. José Roberto de Oliveira pela indicação do mestrado e ajuda no desenvolvimento do trabalho.

Aos novos e antigos amigos, Victor, Luis, Joner, Marcio, Viviane, Girley, Dani, Flávia, Kellie, Luciana, Vicente, Beth, Hugo, José Marcos, Fausto, Daniel, Kameoka, Bia, Victor Dotta e Isabela, pelo companheirismo, momentos de diversão, tempo e apoio dedicados dentro e fora do ambiente de trabalho.

Aos amigos de Marilândia, pelos momentos de alegria e diversão e que mesmo de longe me incentivaram nesta caminhada.

A Camila Massola responsável pelo Laboratório de Resíduos e Áreas Contaminadas do IPT e a todos os técnicos que me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

Os técnicos Fernando e Nilton do Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo que me ajudaram na realização de algumas partes do desenvolvimento deste trabalho.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais Danilo, Livio e Rubens pela ajuda durante o desenvolvimento do trabalho.

A USP e seus funcionários, que me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

A FAPESP, pelo apoio e pela bolsa de estudo.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o estudo do reaproveitamento da parte metálica e a caracterização dos óxidos presente no resíduo de granito gerado na etapa de desdobramento. Inicialmente, foi feita a caracterização química e física do resíduo através de análise química, difração de raios-X, microscopia eletrônica de varredura e análise granulométrica. Após a caracterização do resíduo, foi dado inicio aos processos para a recuperação do Fe metálico que envolveram: separação magnética, mesa concentradora e ciclonagem. A separação magnética foi realizada em três etapas: a primeira onde se utilizou um separador magnético a úmido de alta intensidade, onde foi utilizado apenas o campo magnético remanescente do equipamento. Na segunda etapa, onde o material magnético obtido na primeira etapa foi submetido a uma nova separação magnética manual utilizando um imã de terras raras. Na terceira etapa, o material magnético obtido com o imã de terras raras foi submetido a uma separação magnética manual com um imã ferrítico. Nos ensaios de mesa concentradora, foram realizadas variações na inclinação da mesa, freqüência de oscilação e vazão de água de lavagem. Já nos ensaios de ciclone, o parâmetro variado foi à pressão de alimentação. Foram realizadas variações nos parâmetros dos equipamentos com o intuito de se aperfeiçoar e definir os melhores parâmetros para a recuperação do Fe metálico. Após cada ensaio, foi realizada a análise química volumétrica para a determinação do teor de Fe metálico obtido em cada produto. Pelos resultados obtidos, o método de separação magnética foi a que apresentou os melhores resultados, sendo possível a obtenção de um concentrado ferroso com 93% de Fe metálico e um concentrado granítico com 0,6% de Fe metálico. Já nos ensaios de mesa concentradora, o melhor resultado obtido foi um concentrado ferroso com apenas 13,7% de Fe metálico, e nos ensaios de ciclone foi possível à obtenção de um produto com apenas 7,2% de Fe metálico. A partir do concentrado ferroso e granítico obtido na separação magnética foi realizada a caracterização através de microscopia eletrônica de varredura, difração de raios-X e análise granulométrica. A partir do concentrado ferroso obtido, foram produzidos briquetes com uso de 2% de cal hidratada como aglomerante. Foram realizados testes de resistência mecânica a verde e a seco nos briquetes produzidos. Foi obtido uma resistência mecânica a verde de no máximo 1,02 kN e a seco de no máximo 3,59 kN.

Palavras chave: Rochas ornamentais, Tratamento de resíduos sólidos.

ABSTRACT

The aim of this work is to study the reuse of the metallic part and the characterization of oxides present in the waste from granite sawing. First, the chemical and physical characteristics of the waste were analyzed by chemical analysis, X-ray diffraction, scanning electron microscopy and size analysis. Procedures for the metallic iron recovery (magnetic separation, concentrator table, and cyclonic separation) were performed after the waste characterization. Magnetic separation was performed in three phases. First, using a high intensity wet magnetic separator, which only the remaining magnetic field of equipment was utilized. In the second phase, the magnetic material obtained in first phase was subjected to a new manual magnetic separation using rare earth magnets. In a third phase, magnetic material obtained with rare earth magnets was subjected to manual magnetic separation using ferrite magnets. In the experiments of concentrator table, were carried out changes in table inclination, oscillation frequency and wash water flow. For cyclone tests, the varied parameter was the water supply pressure. Variations in equipment parameters were performed in order to improve and decide the best parameters for recovery of metallic iron. After each experiment, volumetric chemical analysis was performed to determine the metallic iron content of each product. The results show that the magnetic separation method had the best results since it is possible to obtain a ferrous concentrated with 93.0 wt. % metallic iron and granite concentrated with 0.6 wt. % metallic iron. While for concentrator table tests, the best result presented a ferrous concentrated with only 13.6 wt. % metallic iron; and for cyclone tests, a product with only 7.2 wt. % of metallic iron was obtained. Ferrous and granite concentrated from magnetic separation were characterized by scanning electron microscopy, X-ray diffraction and size analysis. Using the obtained ferrous concentrated, briquettes were produced with 2 wt. % hydrated lime as binder. Produced briquettes were tested using dry and wet mechanical strength test. Wet mechanical strengths of up to 1.02kN were obtained, and a maximum of 3.59kN was registered to dry mechanical strength.

Keywords: Ornamental rocks; Solid waste management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Tanque de estocagem de resíduo de rochas ornamentais. 2

Figura 2- Comparação das exportações brasileiras. 4

Figura 3- Faturamento do setor de rochas ornamentais. 4

Figura 4- Evolução das exportações brasileiras de rochas ornamentais. 5

Figura 5- A) Amostra de granito. B) Amostra de mármore. 10

Figura 6- Fluxograma das etapas que são realizadas desde a extração da rocha, beneficiamento e sua aplicação. 12

Figura 7- Tear multi-lâminas utilizado no corte de blocos de rochas ornamentais. ...13

Figura 8- Granalhas utilizadas no processo de corte de rochas.....14

Figura 9- Ciclo de reutilização da polpa abrasiva. 16

Figura 10- Talha-bloco mono-disco com disco diamantado. 17

Figura 11- Talha-blocos multi-discos. 18

Figura 12- Tear com fios diamantados. 19

Figura 13- Politriz manual de bancada fixa. 21

Figura 14- Politriz de multicabeça com esteiras transportadoras. 22

Figura 15- Fluxograma de caracterização e classificação de resíduos. 23

Figura 16- Esquema da mesa concentradora. 27

Figura 17- Efeitos dos mecanismos de concentração gravítica. 29

Figura 18- Espalhamento decorrente do movimento assimétrico da mesa e da velocidade diferencial em escoamento laminar. 29

Figura 19- Regiões do ciclone. 31

Figura 20- Amostra do resíduo coletado. 36

Figura 21- Chapa de aquecimento utilizada na etapa de secagem.....37

Figura 22- Equipamento de difração de raios-X. 40

Figura 23- Microscópio eletrônico de varredura. 41

Figura 24- Equipamento Mastersizer 2000 utilizado nas análises granulométricas. .42

Figura 25- Medidor de umidade por infravermelho.....43

Figura 26- Equipamento de separação magnética a úmido utilizado nos ensaios. ...45

Figura 27- Vista lateral do alimentador e do homogeneizador. 46

Figura 28- Sistema de homogeneização em operação. 47

Figura 29- Mesa concentradora utilizada nos ensaios. 48

Figura 30- Dimensões do ciclone utilizado. 49

Figura 31- Ciclone utilizado nos ensaios. 50

Figura 32- Fluxo causado pelo retorno do *underflow* e *overflow*. 51

Figura 33- Fluxograma da produção de briquetes.....53

Figura 34- Briquetadeira de rolos utilizada na fabricação dos briquetes. 54

Figura 35- Prensa mecânica utilizada nos ensaios de resistência mecânica. 54

Figura 36- Difratograma do resíduo de granito.....57

Figura 37- Imagem de elétrons retro-espalhados do resíduo de granito. 58

Figura 38- Espectro do ponto A da Figura 37.....59

Figura 39- Espectro do ponto B da Figura 37.....59

Figura 40- Análise granulométrica do resíduo de granito. 61

Figura 41- Análise granulométrica do Fe metálico presente no resíduo. 61

Figura 42- Análise granulométrica do resíduo. 62

Figura 43- Fluxograma dos resultados obtidos em cada etapa da separação magnética. 64

Figura 44- Concentrado ferroso obtido na separação magnética do resíduo de granito. 67

Figura 45- Imagem de elétrons retro-espalhados do concentrado ferroso obtido na separação magnética. 68

Figura 46- Espectro de EDS do concentrado ferroso obtido na separação magnética. 69

Figura 47- Difratograma do concentrado ferroso magnético. 70

Figura 48- Distribuição granulométrica do concentrado ferroso obtido na separação magnética. 71

Figura 49- Concentrado granítico obtido na separação magnética. 72

Figura 50- Difratograma do concentrado granítico. 73

Figura 51- Imagem de elétrons retro-espalhados do concentrado granítico obtido na separação magnética. 74

Figura 52- Espectro de EDS do concentrado granítico. 75

Figura 53- Distribuição granulométrica do concentrado granítico obtida na separação magnética. 76

Figura 54- Briquetes produzidos a partir do concentrado ferroso....76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Perfil das exportações de rochas ornamentais brasileiras. 5

Tabela 2- Principais estados e suas participações na exportação de rochas brasileiras. 6

Tabela 3- Principais compradores e suas respectivas contribuições nas exportações de rochas ornamentais. 7

Tabela 4- Composição química típica do mármore. 10

Tabela 5- Composição química típica do granito. 10

Tabela 6- Composição química das granalhas de aço e de ferro fundido. 14

Tabela 7- Valores da taxa de alimentação e porcentagem em massa da polpa abrasiva. 15

Tabela 8- Susceptibilidade magnética de minerais. 26

Tabela 9- Classificação dos aglomerantes. 32

Tabela 10- Parâmetros utilizados nos ensaios de mesa concentradora. 48

Tabela 11- Parâmetros utilizados nos ensaios de ciclone. 52

Tabela 12- Análise química do resíduo de granito. 56

Tabela 13- Análise granulométrica do resíduo de granito. 60

Tabela 14- Resultados obtidos utilizando mesa concentradora. 65

Tabela 15- Resultados obtidos nos ensaios em Ciclone. 66

Tabela 16- Resistência mecânica a verde dos briquetes produzidos. 77

Tabela 17- Resistência mecânica a seco dos briquetes. 78

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....1

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3
2.1 HISTÓRICO.....3
2.2 ECONOMIA MINERAL 3
2.3 ROCHAS ORNAMENTAIS 7
2.3.1 Classificação das Rochas 8
2.4 BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS.....10
2.4.1 Beneficiamento primário.....12
2.4.1.1 Tear de lâminas 13
2.4.1.2 Talha-bloco 16
2.4.1.3 Tear com fio diamantado 19
2.4.2 Beneficiamento final 20
2.4.3 Classificação ambiental do resíduo de rochas ornamentais 22
2.4.4 Aplicações de resíduos de rochas ornamentais.....24
2.5 METODOS UTILIZADOS PARA RECUPERAÇÃO DO FERRO 25
2.5.1 Separação Magnética 25
2.5.2 Mesa concentradora.....27
2.5.3 Ciclone 30
2.6 BRIQUETAGEM 32
2.6.1 Processo de briquetagem 33

3 OBJETIVOS.....35

4 MATERIAIS E MÉTODOS.....36
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO 36
4.1.1 Métodos de caracterização do resíduo 37
4.1.1.1 Análise química 38
4.1.1.2 Difração de raios-X.....39
4.1.1.3 Microscópio eletrônico de varredura.....40
4.1.1.4 Análise granulométrica 41
4.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS 42
4.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....44
4.3.1 Separação Magnética 44
4.3.2 Mesa Concentradora.....46

4.3.3 Ciclonagem 49
4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS OBTIDOS.....52
4.5 BRIQUETAGEM 52

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 56
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO 56
5.1.1 Análise química.....56
5.1.2 Difração de raios-X.....57
5.1.3 Microscopia eletrônica de varredura 58
5.1.4 Análise granulométrica.....60
5.2 RECUPERAÇÃO DO FE METALICO.....62
5.2.1 Separação magnética 62
5.2.2 Mesa Concentradora.....65
5.2.3 Ciclone 66
5.3 CARACTERIZAÇÃO DO CONCENTRADO FERROSO.....67
5.3.1 Microscopia eletrônica de varredura 68
5.3.2 Difração de raios-X.....69
5.3.3 Análise granulométrica.....70
5.4 CARACTERIZAÇÃO DO CONCENTRADO GRANÍTICO.....71
5.4.1 Difração de raios-X.....73
5.4.2 Microscopia eletrônica de varredura 74
5.4.3 Análise granulométrica.....75
5.5 RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS BRIQUETES.....76

6 CONCLUSÕES.....79

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 80

1 INTRODUÇÃO

O setor de rochas ornamentais é um setor que vem crescendo a cada ano devido à quantidade de rochas que são exportadas. Em 2006, a produção brasileira de rochas ultrapassou os 7,5 milhões de toneladas. Já em 2007, a produção chegou a 7,9 milhões de toneladas, ou seja, um crescimento de aproximadamente 6% [(1)]. Em 2008, a produção brasileira de rochas ornamentais sofreu uma queda de aproximadamente 2,2% com relação a 2007, ou seja, a produção alcançada em 2008 foi de 7,8 milhões de toneladas [(2)]. Estima-se ainda que as reservas de granito e mármore são, respectivamente, $6,7x10^{10}$ m^3 e $5,5x10^8$ m^3 [(3)].

O principal destino das rochas produzidas no Brasil é a exportação, principalmente para os Estados unidos com 30,5% da produção brasileira, seguido da China com 19,7%, Itália com 14,9% e Espanha com 5,8%. O principal produto exportado pelo Brasil são as chapas serradas que chegaram a $16,8x10^6$ m^2 em 2007 [(1)]. Pode-se considerar uma estimativa de $42,2x10^6$ m^2 de chapas consumidas no mercado interno, ou seja, no ano de 2007 foi estimada a produção de $5,9x10^7$ m^2 [(1)].

O beneficiamento de rochas ornamentais envolve diversas etapas. A extração das rochas em céu aberto para a transformação em blocos é a primeira dessas etapas. A segunda etapa é onde ocorre o desdobramento dos blocos, ou seja, ocorre à transformação dos blocos em chapas que podem ter várias espessuras. Esta etapa também é conhecida por beneficiamento primário. A última etapa do beneficiamento é a transformação das placas em produto final onde são usados equipamentos denominados de politrizes. É nesta etapa que é realizado o polimento, lustração, corte e acabamento finais das chapas [(4)]. Um dado importante é que a exploração de rochas ornamentais, desde a extração até o acabamento, gera uma quantidade média de 40 a 50% de resíduo [(5)].

No processo de desdobramento (beneficiamento primário) os principais métodos de obtenção das chapas são por corte com lâminas, disco diamantado ou fio diamantado. Nestes processos de corte, 25 a 30% [(6,7)] do bloco acaba se tornando

resíduo. Este resíduo é constituído de água, cal, granalha de aço e rocha moída. Os resíduos são geralmente estocados em locais a céu aberto ou em alguns casos, são jogados em rios sem nenhum tipo de tratamento ocasionando problemas de assoreamento, contaminando as águas de rios e córregos e podendo até mesmo contaminar reservatórios naturais de água [8,9].

Problemas com a saúde humana também podem ocorrer devido a este resíduo como, por exemplo, a silicose, que pode ser causado pela poeira do resíduo quando este se encontra seco. A deposição de lama de corte de rochas pode também causar dano ao solo. Com isso, conflitos com a população e com órgãos ambientais são gerados [10,11,12,13,14]. A Figura 1 ilustra um local de estocagem do resíduo.

Figura 1- Tanque de estocagem de resíduo de rochas ornamentais [11].

Assim, o objetivo deste trabalho é de estudar a recuperação da parte metálica (Fe) presente no resíduo de rochas ornamentais. Para este estudo foram utilizados três equipamentos para a separação da parte metálica dos minerais. Foram utilizados separadores magnéticos, mesa concentradora e ciclone. Foi determinado qual o equipamento que obteve melhor desempenho na recuperação. Após a determinação do melhor equipamento, foram feitos estudos da utilização da parte metálica do resíduo para a fabricação de briquetes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO

No século XIX foi montada a primeira indústria de beneficiamento de mármore no Brasil. Esta industria foi implantada em moldes artesanais por imigrantes italianos e portugueses. Utilizavam métodos rudimentares causando pouco desenvolvimento, principalmente pela concorrência dos mármores italianos [15].

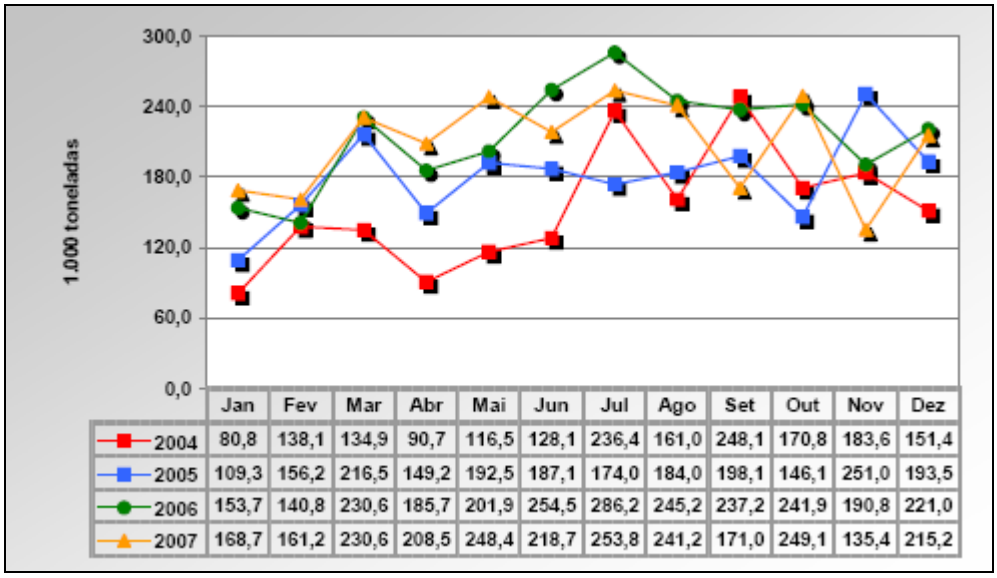
O primeiro tear montado no Brasil foi durante o período da primeira guerra mundial (1914-1918), devido principalmente ao bloqueio marítimo imposto pela guerra. Este tear foi importado e a partir deste, o Brasil começou a construir seus próprios teares com o protótipo importado. Ouro Preto e Mar de Espanha, localizados no estado de Minas Gerais foram os primeiros locais em que se explorou o mármore [16].

Após do começo da exploração de mármore pelo estado de Minas Gerais, outros estados também começaram a sua exploração como, por exemplo, os estados de Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo e Bahia. Durante a década de 70 foi que a exploração de rochas ornamentais teve seu desenvolvimento devido ao consumo interno e exportação de material bruto. O avanço do setor se deu devido à aplicação em elementos de revestimentos em pisos, paredes e fachadas [15].

2.2 ECONOMIA MINERAL

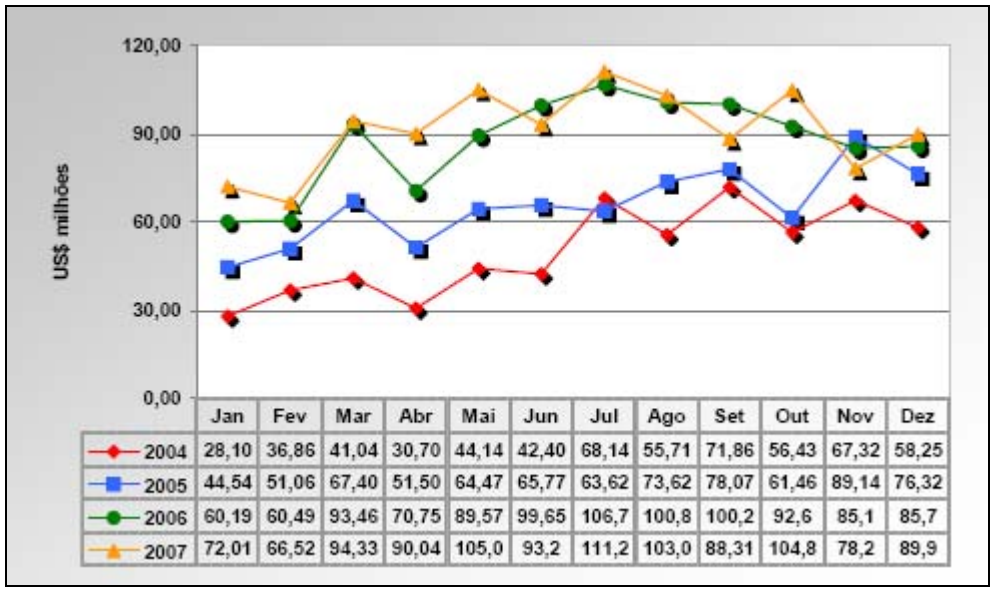
O setor de rochas ornamentais vem aumentando seu espaço no cenário mundial há vários anos. No Brasil, este crescimento foi de aproximadamente 6% ao ano até 2004 [17]. Porém, nos últimos anos este crescimento não vem sendo notado. No ano de 2007, por exemplo, o Brasil teve um decréscimo no volume físico de rochas exportadas em comparação com 2006. Se comparados os lucros obtidos em 2007

com relação a 2006, pode-se observar um aumento de 4,62%. A redução do volume de rochas exportada é reflexo da crise do mercado imobiliário residencial dos Estados Unidos. Pela Figura 2 [1] pode ser observada a variação das exportações brasileiras de 2007 comparadas com anos anteriores, e pela Figura 3 [1] pode ser observado o faturamento do setor ao decorrer dos anos.



	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2004	80,8	138,1	134,9	90,7	116,5	128,1	236,4	161,0	248,1	170,8	183,6	151,4
2005	109,3	156,2	216,5	149,2	192,5	187,1	174,0	184,0	198,1	146,1	251,0	193,5
2006	153,7	140,8	230,6	185,7	201,9	254,5	286,2	245,2	237,2	241,9	190,8	221,0
2007	168,7	161,2	230,6	208,5	248,4	218,7	253,8	241,2	171,0	249,1	135,4	215,2

Figura 2- Comparação das exportações brasileiras [1].



	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2004	28,10	36,86	41,04	30,70	44,14	42,40	68,14	55,71	71,86	56,43	67,32	58,25
2005	44,54	51,06	67,40	51,50	64,47	65,77	63,62	73,62	78,07	61,46	89,14	76,32
2006	60,19	60,49	93,46	70,75	89,57	99,65	106,7	100,8	100,2	92,6	85,1	85,7
2007	72,01	66,52	94,33	90,04	105,0	93,2	111,2	103,0	88,31	104,8	78,2	89,9

Figura 3- Faturamento do setor de rochas ornamentais [1].

Pode-se notar também o aumento da quantidade de rochas processadas exportadas. Em 1997, por exemplo, apenas 13,1% em peso das exportações foram

de rochas processadas. Já em 2007 este valor passou para 52,6% [1]. A Figura 4 [1] indica a evolução das exportações brasileiras de rochas ornamentais.

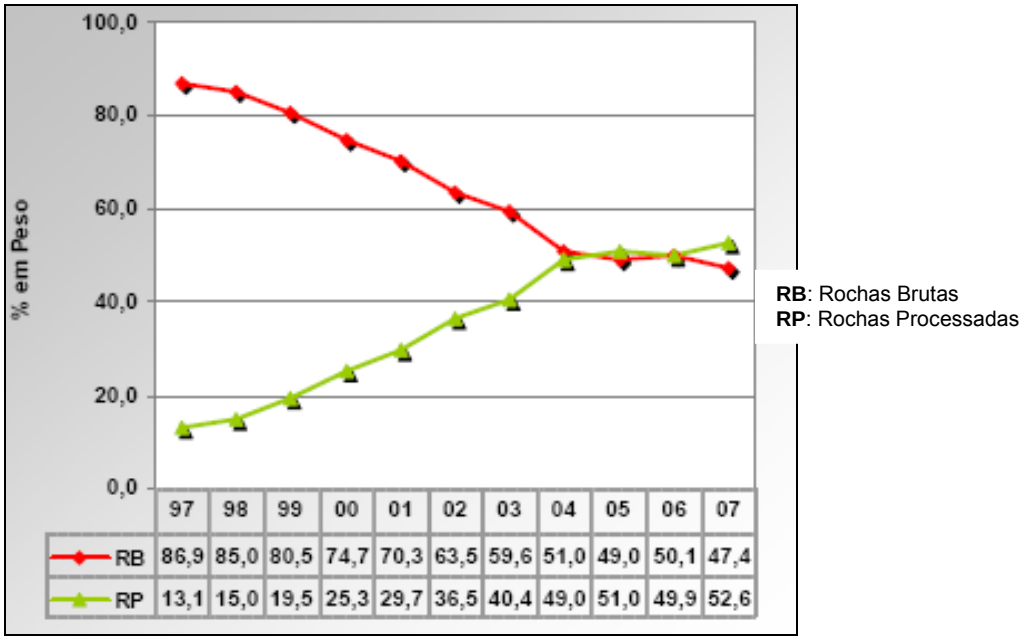


Figura 4- Evolução das exportações brasileiras de rochas ornamentais [1].

Entre os principais produtos comercializados de exportação do Brasil apenas seis produtos se destacam: chapas de granito, blocos de granito, ardósia, quartzito foliado e a pedra sabão. A Tabela 1 [1] indica este perfil de exportação do setor de rochas.

Tabela 1- Perfil das exportações de rochas ornamentais brasileiras [1].

	2006		2007		
Produtos Comerciais	**Faturamento A (US$ Milhões)**	**Participação Brasil (%)**	**Faturamento B (US$ Milhões)**	**Participação Brasil (%)**	**Variação B/A (%)**
Chapas Granito	688,3	63,2	729,5	66,7	+ 6,0
Blocos Granitos	200,0	19,1	194,0	18,7	- 3,0
Ardósia	84,6	8,1	98,4	9,0	+ 16,3
Quartzito Foliado	32,8	3,1	40,3	3,7	+22,9
Pedra-Sabão	15,4	1,5	18,3	1,7	+ 18,8
Outros	24,0	2,3	13,0	1,2	-47,8
Total	1.045,1	100	1093,5	100	+ 4,6

O Espírito Santo é o estado que mais exporta, sendo responsável por 66,4% das exportações brasileiras. Outros estados importante na exportação são: Minas Gerais, Rio de Janeiro, Bahia, São Paulo, Ceará, e Paraíba [1]. Estes setes estados são responsáveis por 94,8% das exportações de rochas do Brasil. A Tabela 2 [1] mostra os dados desses estados na participação das exportações brasileiras.

Tabela 2- Principais estados e suas participações na exportação de rochas brasileiras [1].

Estado	Valor Exportado US$ milhões	Perfil do faturamento		Participação Brasil	Variação 2007/2006
		Rochas Brutas	Rochas Processadas		
Espírito santo	726,1	13,9%	86,1%	66,4 %	+ 6,8 %
Minas Gerais	211,3	25,1%	74,9%	19,3 %	+ 13,0 %
Rio de Janeiro	33,8	0,2%	99,8%	3,1 %	- 18,2 %
Bahia	19,0	91,1%	8,9%	1,7 %	- 31,9 %
São Paulo	25,8	4,6%	95%	2,4 %	+ 4,2 %
Ceará	11,2	24,1%	75,9	1,0 %	- 10,8 %
Paraíba	9,9	48,1	51,9	0,9 %	+ 9,7 %
Total	1.037,10	-	-	94,8 %	-

Entre os municípios que se destacam na produção pode-se citar: Cachoeiro do Itapemirim/ES, Ourolândia/BA, Campo Formoso/BA, Mirangaba/BA, Italva/RJ, Fronteiras/PI, Nova Venécia/ES, Barra de São Francisco/ES, São Gabriel/ES, Rui Barbosa/BA, Medeiros Neto/BA, Formiga/MG e Itapecerica/MG [18].

Com relação aos compradores de rochas ornamentais do Brasil podem-se destacar os Estados Unidos que são os maiores compradores das rochas brasileiras com um total de 30,5% em volume das exportações, seguida pela China com 19,7%, Itália com 14,9%, e Espanha com 5,8%. Em termos de faturamento, os Estados Unidos são responsáveis por 58,2% do total do faturamento brasileiro, a Itália vem em segundo com 7,8% do faturamento, China em terceiro com 6,5% e a Espanha em quarto com 3,4%. A Tabela 3 [1] indica os principais compradores e suas respectivas contribuições nas exportações de rochas ornamentais.

Tabela 3- Principais compradores e suas respectivas contribuições nas exportações de rochas ornamentais [1].

Países	Volume Físico Exportado (1000t)	Participação exportações brasileiras	Valor exportado US$ milhões	Participação exportações brasileiras	Preço médio US$/t
EUA	764,0	30,5%	626,1	58,2%	832,5
Itália	373,6	14,9%	84,9	7,8%	227,3
China	493,5	19,7%	70,8	6,5%	143,5
Espanha	143,9	5,8%	37,5	3,4%	262,1
Total	1.775,0	71,0%	829,3	75,8%	

2.3 ROCHAS ORNAMENTAIS

Rocha ornamental é definida como sendo um material rochoso natural, submetido a diferentes graus de aperfeiçoamento (apicoado, frameado, polido e recortado) e utilizado para exercer uma função estética [19].

São largamente utilizadas na construção civil como revestimentos internos e externos de paredes, pisos, soleiras, na fabricação de móveis, na arte funerária, em diversas outras aplicações.

O uso das rochas ornamentais, principalmente o granito, em substituição a outros produtos na construção civil é crescente devido às vantagens de uso, tais como: resistência, durabilidade, facilidade de limpeza e estética. Como é resistente ao ataque químico e ao desgaste abrasivo, a utilização do granito em revestimentos externos tem aumentado, tanto em pisos quanto em fachadas [20].

De acordo com Sossai [21], a extração de rochas brasileiras chega a seiscentas variedades comerciais, como por exemplo, granito, mármore, ardósia, quartzito, travertino, pedra sabão, basalto, serpentinito, conglomerados, pedra talco entre outras. Ainda segundo o autor [21], estima-se a existência de 11.100 empresas do setor atuando no Brasil.

2.3.1 Classificação das Rochas

Rochas são classificadas em três grupos baseadas em sua origem [22]:

- Rochas ígneas;
- Rochas sedimentares;
- Rochas metamórficas.

Rochas ígneas são formadas pela cristalização de matéria mineral fundida em grandes profundidades e a alta temperatura, onde que a textura da rocha formada vai depender das condições de cristalização [22,23]. Granito, gabros e basalto são exemplos de rochas ígneas.

Rochas ígneas podem ainda ser classificadas como rochas extrusivas e intrusivas [24]. Rochas extrusivas são as rochas que atingem a superfície terrestre, são geralmente formadas por erupções vulcânicas. O resfriamento é mais rápido, gerando cristais finos. Rochas ígneas intrusivas são aquelas em que o resfriamento acontece no interior da terra, onde o resfriamento é lento formando rochas com granulação média a grosseira.

Também se pode classificar as rochas ígneas de acordo com a rapidez de resfriamento. De acordo com esta classificação, as rochas podem ser denominadas como rochas holocristalinas, hemicristalinas e não-cristalinas [25]. Rochas holocristalinas são as rochas formadas por resfriamento lento, assim, todos os constituintes são cristalizados. Rochas hemicristalinas são formadas por resfriamentos mais rápidos do que as rochas holocristalinas, mas não bruscamente. Já as rochas não-cristalinas são as rochas formadas através do resfriamento rápido do magma.

Outra classificação das rochas ígneas é com base no conteúdo de sílica. De acordo com esta classificação, as rochas ígneas podem ser classificadas em quatro classes, que são: ácidas - quando o teor de sílica é maior do que 66%; intermediárias - para teores de sílica entre 52 a 66%; básicas - para teores de sílica compreendida entre 45 a 52%; e ultrabásicas - com porcentagem de sílica menor do que 45% [26].

Com relação às rochas sedimentares, estas são formadas através do acumulo de matéria orgânica ou por precipitação química de fragmentos de rochas ou de solos, que são transportados por vento ou hidraulicamente. Exemplos desse tipo de rochas são: conglomerados, arenitos, mármores calcíticos e dolomíticos.

Já as rochas metamórficas são derivadas das rochas ígneas ou sedimentares que sofreram recristalização devido à ação da pressão, água e temperatura. Exemplos destes tipos de rochas são: gnaisse, mármore e quartzito.

Rochas ornamentais também podem ser classificadas de acordo com sua comercialização. Nesta classificação, as rochas ornamentais e semi-ornamentais são divididas em granito, mármore, ardósia e em alguns lugares são citadas também o basalto [27]. Para Mello [28], o granito e o mármore são as duas principais rochas na classificação de comercialização. Isso se deve ao fato de estas duas rochas representam um volume de extração de 57% para o granito e 18% para o mármore do total de rochas extraídas. Ribeiro *et al* [29] confirmam este dado. De acordo com os autores [29], o setor de rochas ornamentais e de revestimentos ultrapassou 5,2 milhões de toneladas no ano de 2000, e desse total, três milhões de toneladas foram de granito e um milhão de toneladas de mármore, e o restante sendo de ardósia e quartzito.

Segundo Nery [30], em termo comercial, granito é qualquer rocha não calcária, capaz de ser serrada e polida, sendo usada como material de revestimento ou de adorno, sendo constituído principalmente por quartzo, feldspato e mica. Na Figura 5A é apresentada uma amostra de granito.

Já o mármore tem em sua composição mais de 50% de minerais carbonáticos [31]. Sua estrutura é maciça e granulometria variada. Em termos comerciais, mármore é toda rocha calcária, capaz de ser serrada e de receber polimento, incluindo-se rochas calcárias metamórficas ou sedimentares [30]. Na Figura 5B é apresentada uma amostra de mármore. Na Tabela 4 [32,33] são apresentadas composições típicas de dois tipos de mármore e na Tabela 5 [10,28] são apresentadas composições de dois tipos de granitos.

Tabela 4- Composição química típica do mármore [32,33].

Composição	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	P.F.
Peso(%)	34,7	18,6	2,05	0,17	0,25	40,2
Peso(%)	41,31	9,73	5,78	0,31	0,01	41,4

Tabela 5- Composição química típica do granito [10,28].

Composição	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	K_2O	MgO	CaO	Na_2O	P.F.
Peso (%)	35,5	8,22	6,63	0,96	3,44	6,59	12,62	3,15	14,5
Peso (%)	68,01	14,99	3,67	0,54	4,82	0,73	2,28	1,65	2,86

Figura 5- A) Amostra de granito. B) Amostra de mármore [34,40].

2.4 BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Segundo Peyneau [4] e Coimbra filho [35] o processo de beneficiamento de rochas ornamentais é dividido em três etapas: processo de extração, beneficiamento primário e beneficiamento secundário ou final.

Processo de extração (ou lavra) é definido como sendo a remoção de um produto útil ou economicamente viável de maciços rochosos ou matacões [35,36]. Nesta etapa do beneficiamento é obtido um bloco que possui dimensões variadas.

O processo de beneficiamento primário é onde os blocos vindos do processo de extração são serrados em forma de chapas que têm sua espessura variável, de acordo com as especificações dos clientes. Nesta etapa, as chapas apresentam espessura próxima à do produto final. Este processo de desdobramento de blocos de rochas ornamentais é realizado em equipamentos denominados teares.

O processo de beneficiamento secundário também conhecido por beneficiamento final é o processo onde ocorre o acabamento propriamente dito. É nesta etapa que é realizado o acabamento das chapas de acordo com as especificações dos clientes.

Na Figura 6 [18] é apresentado um fluxograma das etapas que são realizadas desde a extração da rocha, beneficiamento e sua aplicação.

Segundo Almeida e Pontes [37], durante o processamento desde a extração até o acabamento final das rochas ornamentais, é gerada uma quantidade de rejeito significativa, variando entre 40 a 50% em média.

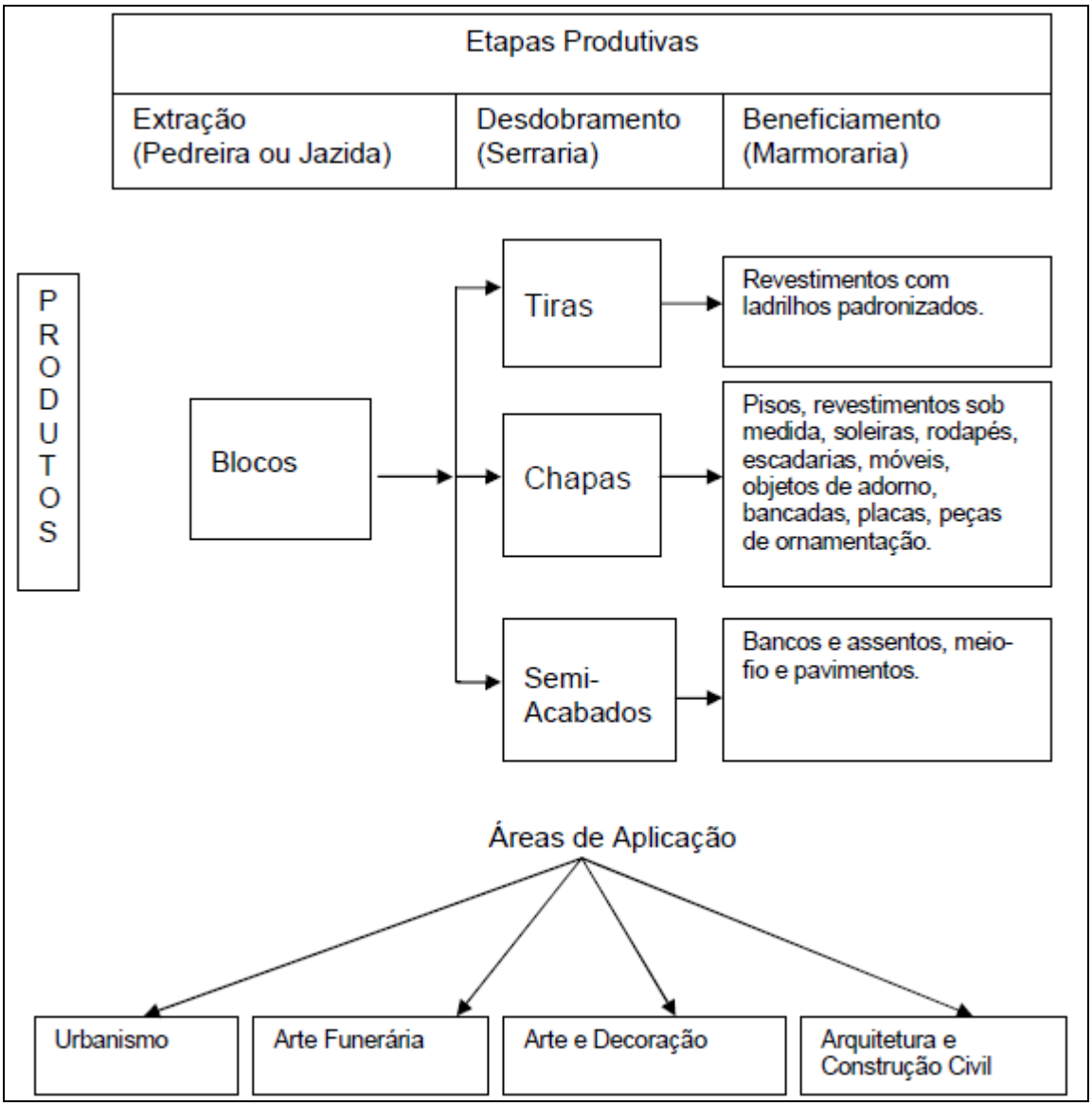


Figura 6- Fluxograma das etapas que são realizadas desde a extração da rocha, beneficiamento e sua aplicação [18].

2.4.1 Beneficiamento primário

O beneficiamento primário é responsável pela transformação dos blocos de rochas em chapas com espessuras que variam de acordo com as exigências dos consumidores, geralmente variando de 10, 20 ou 30 mm.

Para o desdobramento dos blocos em chapas, são empregados três tipos de corte que são basicamente o tear de lâminas, o talha-bloco de disco diamantado e o fio diamantado [38].

2.4.1.1 Tear de lâminas

O corte com tear de lâminas é um dos métodos de corte mais usados no beneficiamento de rochas ornamentais. Isto se deve a vários fatores: a produtividade, custo reduzido, relação entre custo/ beneficio do investimento inicial [35]. A Figura 7 [35] ilustra um tear de multi-lâminas.

Figura 7- Tear multi-lâminas utilizado no corte de blocos de rochas ornamentais [35].

O principal insumo consumido no processo de corte com tear multi-lâminas é a polpa abrasiva (constituída por água, granalha e cal).

A granalha é o insumo responsável pelo corte das rochas. São materiais feitos de aço ou de ferro fundido, que podem possuir uma forma arredondada ou angular. Normalmente o que se usa no processo de corte é uma mistura das duas formas. As granalhas com forma arredondada têm a função de um rolamento para as lâminas.

Já as granalhas com forma angular são as responsáveis por romper os cristais da rocha, ou seja, são as responsáveis pelo corte [35]. De acordo com Pontes [24], a granulometria ideal para as granalhas é de 0,7 a 1,2 mm, com uma distribuição média de 30% de granalhas da forma esférica e 70% na forma angular. Na Tabela 6 [39] são apresentadas composições químicas de granalhas utilizadas nos processos de corte de rochas e na Figura 8 [35] são ilustradas as granalhas que são usadas no processo de corte das rochas.

Tabela 6- Composição química das granalhas de aço e de ferro fundido [39].

Tipo de granalha	Elementos	Porcentagem
Aço	C	0,75% a 1,20%
	Si	0,40% a 1,20%
	Mn	0,60% a 1,20%
	P	0,05% máximo
	S	0,05% máximo
Ferro fundido	C	3,20% a 3,60%
	Si	1,30% a 1,80%
	Mn	0,50% a 0,80%
	P	0,2% máximo
	S	0,25% máximo

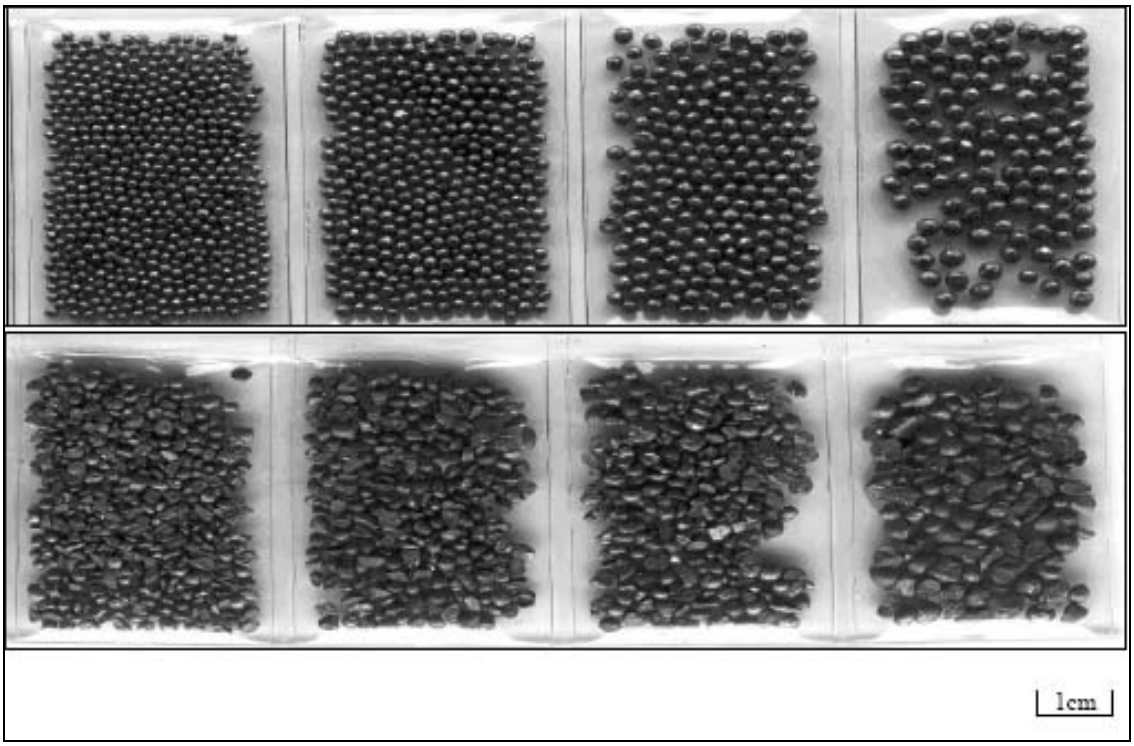


Figura 8- Granalhas utilizadas no processo de corte de rochas [39].

A cal é adicionada para evitar que as granalhas oxidem. Também é responsável para que não ocorra à formação de ferrugem nas chapas e regular a viscosidade da polpa abrasiva [35].

A Tabela 7 apresenta valores da taxa de alimentação (kg/h) e porcentagem em massa dos principais constituintes da polpa abrasiva em uma empresa de Cachoeiro de Itapemirim no Espírito Santo [40].

Tabela 7- Valores da taxa de alimentação e porcentagem em massa da polpa abrasiva [40].

Componentes da Polpa	Taxa de Alimentação (kg/h)	Percentagem em Peso (%)
Cal	7,86	7,85
Granalha	3,6	13,6
Água	20,8	78,55
Total	32,26	100,00

Os principais objetivos de uma polpa abrasiva são [11]:

- Lubrificar e resfriar as lâminas;
- Evitar a oxidação das chapas;
- Servir de veículo para os abrasivos;
- Limpar os canais entre as chapas.

A polpa abrasiva é armazenada em um poço localizado abaixo do tear que é denominado de poço principal. Através de um sistema de bombeamento, o bloco é banhado com a polpa abrasiva. A polpa então retorna para o poço principal, onde são realizados ensaios para a análise da viscosidade. Então, a polpa retorna novamente para o bombeamento.

Quando a polpa está saturada de pó de rocha, ou quando as granalhas se encontram desgastadas, descarta-se uma parte em outro poço denominado de poço de expurgo. Este processo de expurgo depende de variáveis como, por exemplo, o tipo de rocha que esta sendo beneficiada e da qualidade da granalha de aço utilizada no processo [40]. Esta polpa já é denominada como resíduo.

Na polpa remanescente no poço principal é adicionada uma nova polpa sem a presença de pó de rocha e com novas granalhas. O resíduo armazenado no poço de expurgo então é bombeado para tanques de decantação. A Figura 9 [4] mostra o ciclo de reutilização da polpa abrasiva.

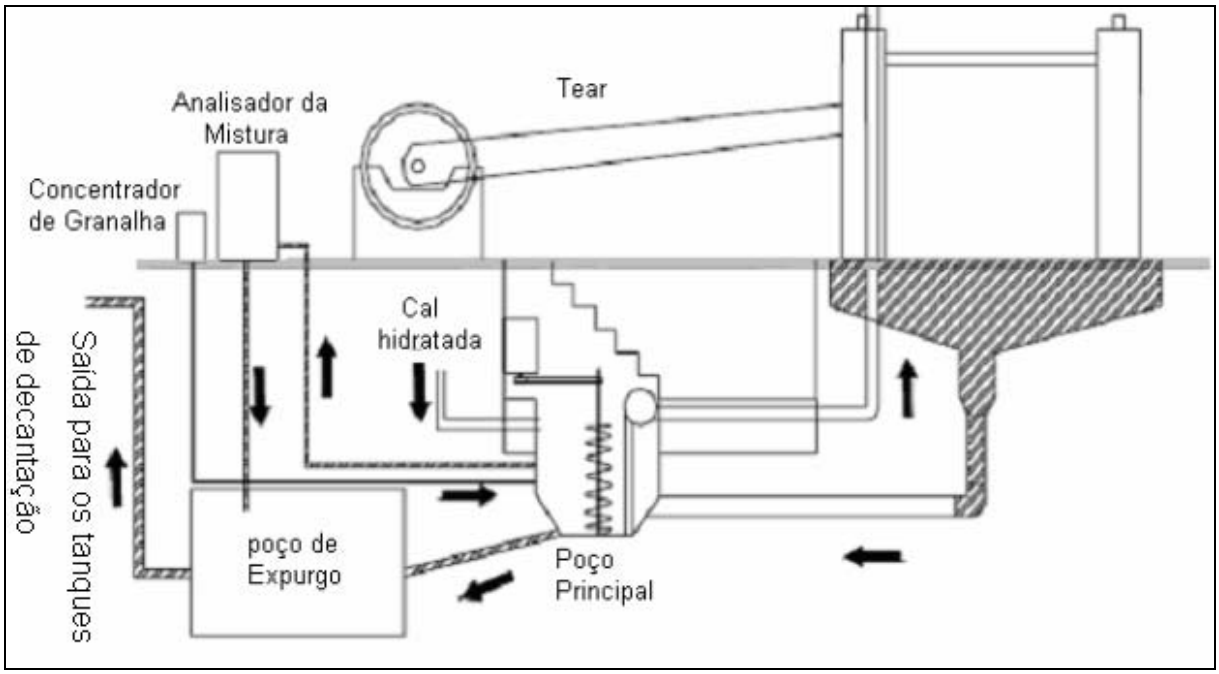


Figura 9- Ciclo de reutilização da polpa abrasiva [4].

2.4.1.2 Talha-bloco

Neste tipo de equipamento, o corte é realizado através da utilização de discos diamantados. O corte com talha-bloco é um método pouco difundido quando comparado ao corte por tear multi-lâminas [35,41]. Este fato se dá devido a este método ser recente. Este equipamento possui uma produtividade média de 10% superior quando comparado ao corte com tear multi-lâminas.

É possível efetuar o corte em vários ângulos diferentes, assim, podendo obter vários formatos no desdobramento dos blocos. Uma desvantagem desta tecnologia em comparação ao tear multi-lâminas é o seu custo médio de produção. Nestes

equipamentos, os custos de produção são mais elevados do que para os teares. Isto se deve principalmente ao preço dos equipamentos e aos discos diamantados.

Têm-se dois tipos de talha-blocos: os talha-blocos mono-disco com disco diamantado e os multi-discos.

Talha-blocos mono-disco com disco diamantado é um equipamento em que o corte é efetuado por um único disco diamantado onde sua profundidade de corte pode chegar a 120 a 160 cm. A dimensão do disco pode variar de 350 a 500 cm, e geralmente são construídos para o esquadrejamento de granitos. Este tipo de equipamento pode ser usado como um opcional ao uso do tear para a produção de chapas com espessuras maiores do que de 2 a 3 cm [35].

Um problema no uso deste equipamento é a largura do canal de corte, pois é maior do que os canais de corte produzidos, por exemplo, com teares de lâminas [42]. A Figura 10 [35] mostra o talha-bloco mono-disco com disco diamantado.

Figura 10- Talha-bloco mono-disco com disco diamantado [35].

Muitas são as vantagens apresentadas por este equipamento dentre as quais pode-se citar [35]:

- Ciclo produtivo mais rápido;
- Melhor acabamento superficial das chapas;
- Melhor aproveitamento de blocos de várias dimensões;
- Necessidade de pouca mão de obra;
- Pouco tempo de parada.

Porém, apresentam algumas desvantagens como [35]:

- Maior investimento inicial;
- Maior custo operacional;
- O disco de corte é de alto custo.

Talha-blocos multi-discos são equipamentos utilizados no corte tanto de mármore como de granito. São usados para a obtenção de tiras com determinadas larguras que são definidas pelo diâmetro do disco e pelas dimensões finais que o material deve possuir. A profundidade de corte máxima possível é de aproximadamente 1/3 do diâmetro do disco. Para o caso do corte de mármore, por exemplo, são encontrados equipamentos com discos verticais de 50 a 160 cm de diâmetro, sendo possível corte com uma profundidade de aproximadamente 15 a 55 cm [42]. A Figura 11 [35] ilustra o equipamento talha-blocos multi-discos.

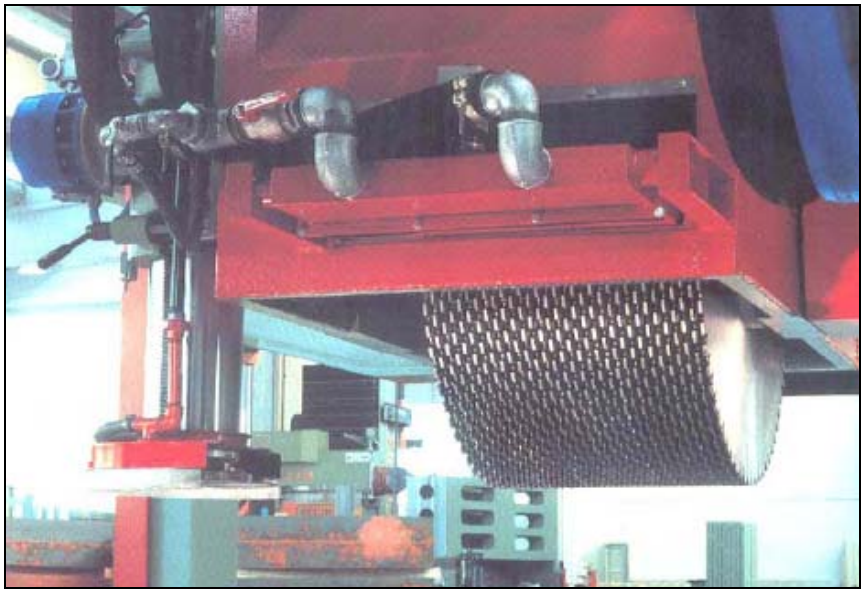


Figura 11- Talha-blocos multi-discos [35].

2.4.1.3 Tear com fio diamantado

Das tecnologias de corte empregadas nas rochas ornamentais, o mais recente é o corte com fio diamantado. O corte ocorre devido à ação abrasiva dos anéis ou pérolas com grãos de diamantes que estão dispostos ao longo do fio [35].

O corte com fio diamantado é aplicado basicamente ao esquadrejamento de blocos e de peças curvas. Os fios diamantados são compostos por cabo de aço inox de tipo flexível, composto por fios torcidos, com diâmetro 5 mm, sobre o qual são enfiadas pérolas (*bead*) diamantadas, de 11 mm de diâmetro, separadas por anéis de borracha e/ ou molas espaçadoras. O número de pérolas pode variar de 32 a 40 por metro. Os trechos de cabo são emendados por conexões de rosca ou conexões de pressão. O cabo pode variar em comprimentos de 50 a 70 metros com trechos de 5 a 10 metros [43]. Uma ilustração de um tear com fios diamantados pode ser observada na Figura 12 [44].

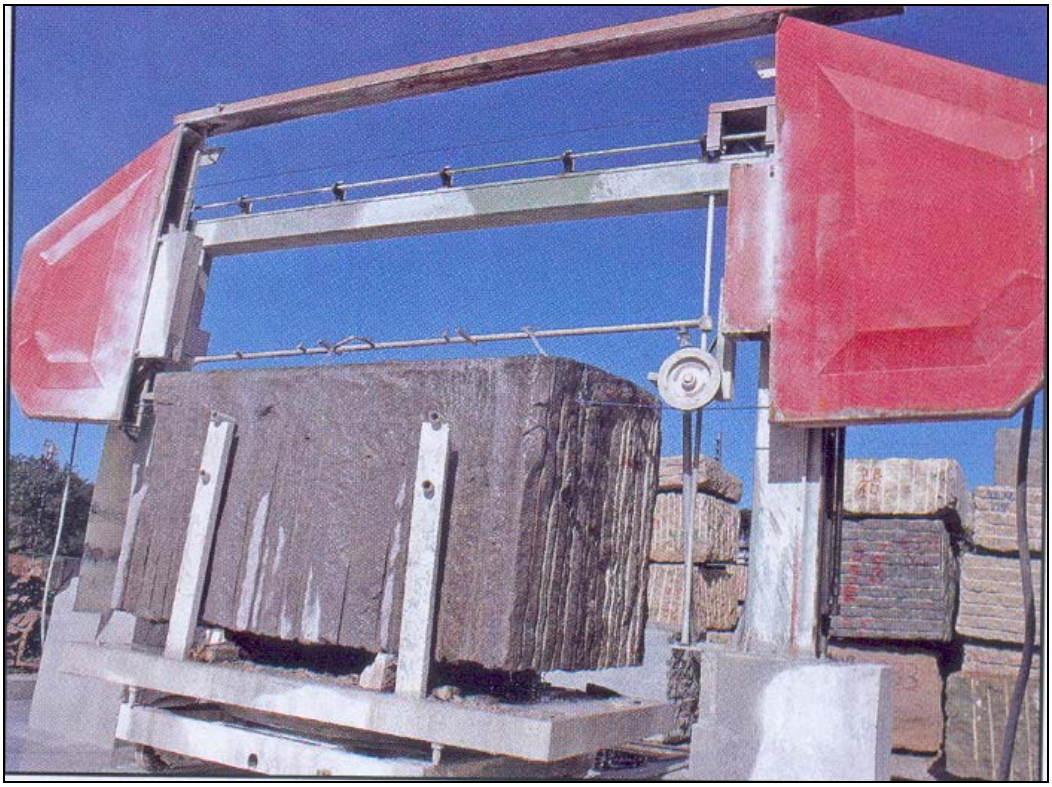


Figura 12- Tear com fios diamantados [44].

O método de corte com fios diamantados apresenta muitas vantagens quando comparado aos modelos que utilizam lâminas para efetuar o corte. Essas vantagens são [35]:

- Menor tempo de serragem independentemente da dureza da rocha;
- Menor custo na serragem;
- Necessita menos obras de fundação;
- Necessita de menor área para acomodação das instalações;
- Chapas com diferentes espessuras num mesmo corte;
- Não há a necessidade do uso da polpa abrasiva, somente água;
- Baixo nível de ruídos;
- Em alguns casos, não há a necessidade da primeira etapa de polimento das placas, proporcionando com isso uma economia.

2.4.2 Beneficiamento final

São as etapas realizadas após o corte que tem como função realçar a cor, brilho e padronizar as dimensões.

O processo que é responsável pelo brilho e realce das cores presentes nas chapas é chamado de polimento. O brilho e lustre das chapas são realizados através da eliminação das rugosidades que estão presentes na superfície das chapas decorrente do processo de corte, juntamente com a eliminação de poros dos diferentes minerais ou cristais que constituem a chapa.

Para o processo de polimento, são utilizados materiais abrasivos, geralmente carboneto de silício, com granulometria decrescente até que se chegue no polimento desejado. Juntamente com o material abrasivo, é utilizada água, que é responsável pela refrigeração e retirada dos resíduos gerados [35].

O processo de polimento pode ser dividido em duas etapas, o levigamento e o polimento. A primeira é onde ocorre a eliminação das rugosidades mais acentuadas que decorreram da etapa de corte, gerando uma superfície mais regular e uniforme,

e também revelando com maior clareza as definições de cores das chapas. A etapa de polimento é a responsável pela eliminação dos poros, que ocorre com a aplicação de resinas, geralmente do tipo epóxi, assim, tentando obter o máximo de brilho que as chapas podem atingir [24,45].

De acordo com Ponte [24], os tipo de politrizes são:

- Politrizes manuais de bancada fixa;
- Politrizes de ponte móvel com bancada fixa;
- Politrizes multicabeças com esteiras transportadoras.

Politrizes manuais de bancada fixa são geralmente usadas em pequenas marmorarias onde a produção vária entre 1 a 2 m^2 por hora. A utilização destes equipamentos é bastante restrito, devido principalmente às limitações quanto à produtividade e qualidade. A Figura 13 [35] ilustra uma politriz manual de bancada fixa.

Figura 13- Politriz manual de bancada fixa [35].

Politrizes de ponte móvel com bancada fixa como são máquinas antigas, são usadas somente em pequenas escalas de produção.

Politrizes multicabeças com esteiras transportadoras são equipamentos que podem ser empregados tanto para o polimento de mármore como de granito. Podem ser encontrados equipamentos de 8 a 20 cabeças. A Figura 14 [35] apresenta uma politriz de multicabeça com esteiras transportadoras.

Figura 14- Politriz de multicabeça com esteiras transportadoras [35].

2.4.3 Classificação ambiental do resíduo de rochas ornamentais

A norma NBR 10.004 [46] mostra como são classificados os resíduos sólidos. A Figura 15 [46] apresenta o fluxograma de caracterização de classificação de resíduos.

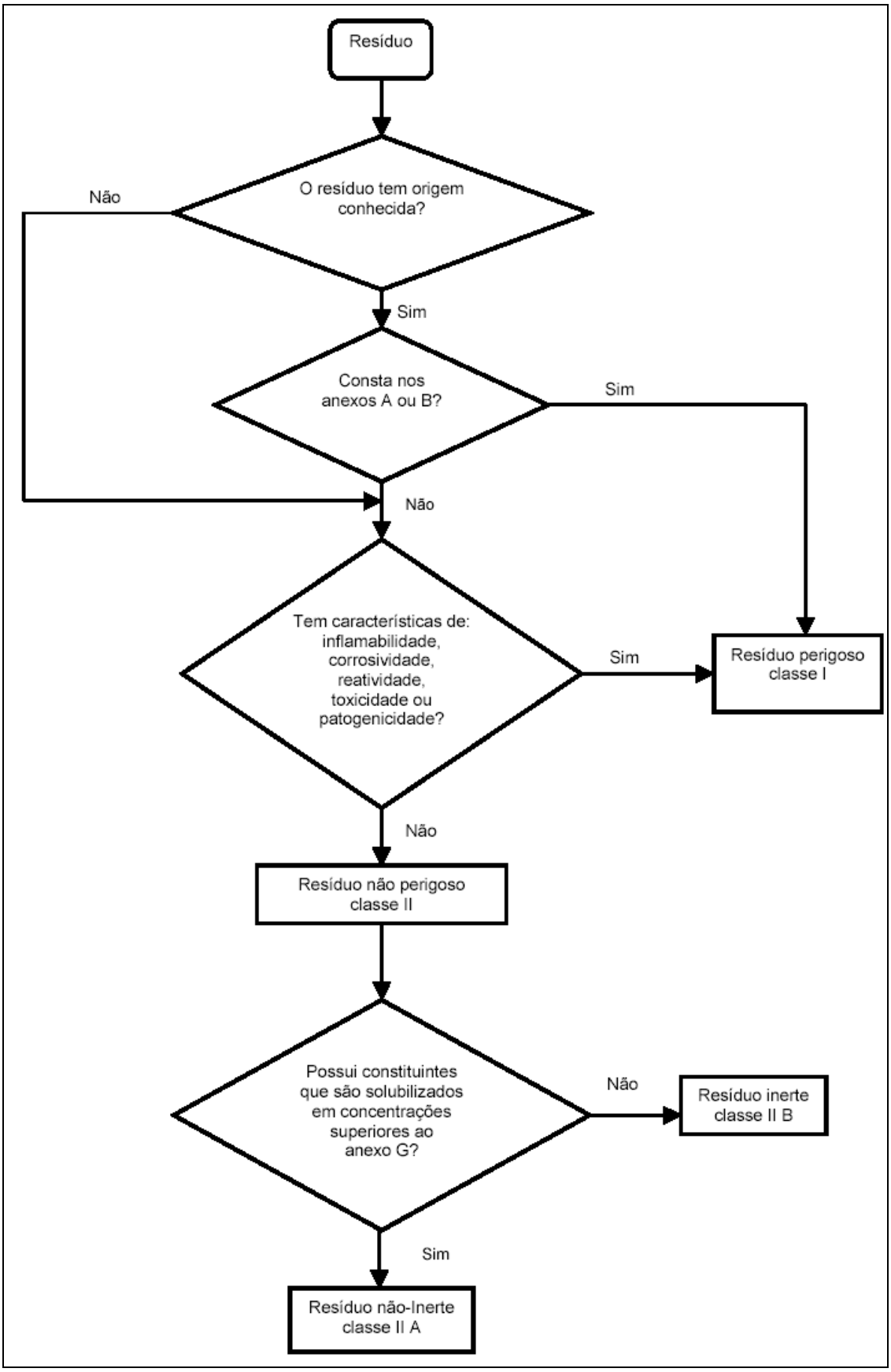


Figura 15- Fluxograma de caracterização e classificação de resíduos [46].

Os resíduos são divididos nas seguintes classes:

- Resíduos Classe I – perigosos; aqueles que apresentam características como: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade;
- Resíduos Classe II A – não-inertes; segundo a norma, são aqueles que não se enquadram como resíduo classe I – Perigosos ou de resíduo de classe II B. Estes resíduos podem ter como propriedades a combustibilidade, a biodegradabilidade ou a solubilidade em água;
- Resíduo Classe II B – inertes; são aqueles que, quando submetidos a um contato estático ou dinâmico com a água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme teste de solubilização realizado segundo a norma NBR 10.006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos de potabilidade de água.

De acordo com Moreira; Freire e Holanda [47] esta lama do resíduo de granito quando seca torna-se um resíduo sólido não biodegradável, sendo classificado como resíduo de classe II B – inerte.

2.4.4 Aplicações de resíduos de rochas ornamentais

Vários países têm realizado estudos com o objetivo de solucionar problemas de geração de resíduos industriais. Uma saída para este problema é a reciclagem destes materiais. No setor de rochas ornamentais não é diferente. Vários pesquisadores têm feito estudos com resíduos gerados durante a etapa de desdobramento dos blocos visando o seu aproveitamento [48].

Os principais motivos para a reciclagem, são: o esgotamento das reservas confiáveis, a conservação de fontes não renováveis, melhoria da saúde e segurança da população e a preocupação com o meio ambiente [48].

Dentre as pesquisas que tem sido realizada com o resíduo de granito, pode-se destacar a sua utilização na construção civil. Pode-se citar como exemplo a sua utilização em argamassas [9] , concretos [49], blocos e revestimentos cerâmicos [48], cerâmica vermelha [47], concretos asfálticos [11] e telhas [50].

2.5 METODOS UTILIZADOS PARA RECUPERAÇÃO DO FERRO

2.5.1 Separação Magnética

Sampaio e Luz [51] classificam o método de separação magnética em dois tipos: separação magnética a seco e separação magnética a úmido. O primeiro método é geralmente utilizado para materiais que possuem uma granulometria mais grossa enquanto a separação magnética a úmido é geralmente empregada para granulometrias menores.

Ainda podem-se subdividir estes equipamentos com relação às características do campo magnético, nos quais podem ser encontrados separadores magnéticos de alta e baixa intensidade, estes podem ser tanto separadores a seco ou a úmido.

Separadores magnéticos de alta intensidade têm suas aplicações mais voltadas para minerais paramagnéticos, e quando utilizado para minerais ferromagnéticos a separação é dificultada devido à alta susceptibilidade magnética apresentada por estes minerais.

Susceptibilidade magnética é a propriedade de um material que determina a sua resposta a um campo magnético. Assim, quando o mineral a ser separado apresenta alta susceptibilidade magnética, o equipamento mais indicado é o separador magnético de baixa intensidade.

Com relação à susceptibilidade magnética, um material pode ser classificado como ferromagnético, paramagnético e diamagnético. Materiais ferromagnéticos

apresentam elevada magnetização podendo a sua susceptibilidade chegar a até 10^6 SI [52]. Exemplos de materiais ferromagnéticos são: ferro, níquel e cobalto puros ou em ligas com outros elementos.

Já os materiais que são atraídos fracamente por imãs são conhecidos como paramagnéticos. Exemplos de materiais paramagnéticos são: zinco, molibdênio e magnésio.

Materiais diamagnéticos são os materiais que respondem ao tipo mais fraco de resposta magnética de um sistema. Possuem susceptibilidade magnética negativa (da ordem de 10^{-5}SI [53]), ou seja, são repelidos quando sujeitos a um campo magnético. Exemplos de materiais diamagnéticos são: quartzo, magnesita e calcita.

Na Tabela 8 [54] são apresentados valores de susceptibilidade magnética de alguns minerais.

Tabela 8- Susceptibilidade magnética de minerais [54].

Mineral	**Susceptibilidade Magnética (10^{-6} SI)**
Dolomita	-12,5 a 44
Calcário	10 a 25.000
Arenito	0 a 21.000
Granito	10 a 65
Quartzo	-15
Hematita	420 a 38.000
Magnetita	70.000 a $2x10^7$

Segundo Luz e Sampaio [51], para a separação magnética do ferro é necessário que o campo magnético esteja entre 500 a 5.000 Gauss.

Pontes [24] realizou ensaios de separação magnética em resíduo de granito. Em seus experimentos utilizou separadores magnéticos de alta e baixa intensidade. O autor [24] chegou à conclusão de que a separação magnética tanto de alta quanto de baixa intensidades com tubo Davis, foi possível uma redução do teor de ferro de 50%. O autor [24] também utilizou em seus experimentos separação magnética com tambor, concluindo que este tipo de separação não é promissor, pois alcançou uma redução de apenas 32% de ferro do resíduo e obtendo um concentrado ferroso com apenas 7% de ferro.

2.5.2 Mesa concentradora

Mesa concentradora é um equipamento geralmente constituída de um deck (*riffles*) de madeira revestida com algum material de alto coeficiente de fricção, geralmente borracha ou plástico [24]. É um equipamento que utiliza os princípios da concentração gravítica na separação. A Figura 16 [55] apresenta um esquema da mesa concentradora.

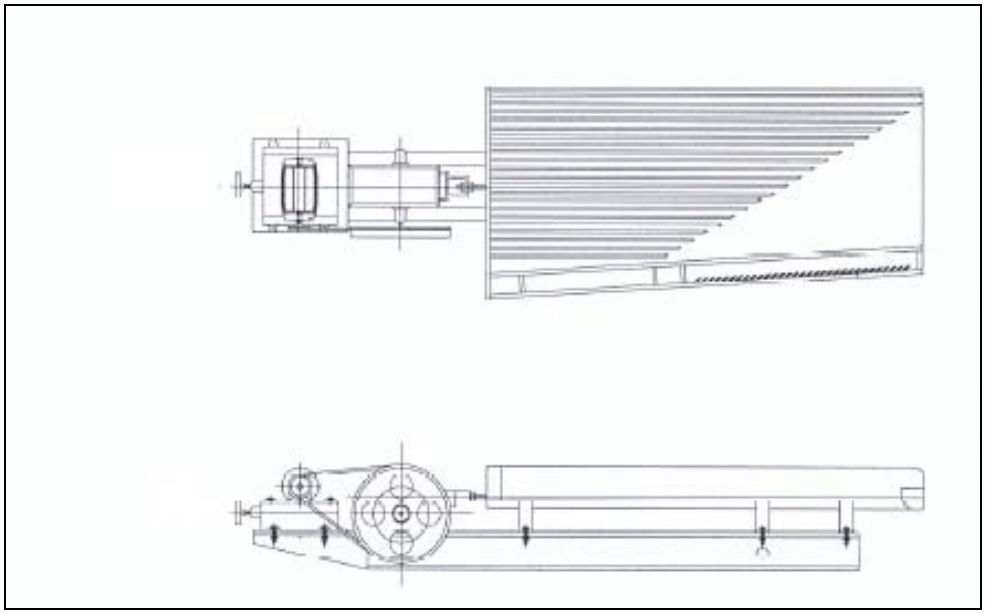


Figura 16- Esquema da mesa concentradora [55].

Concentração gravítica pode ser definida como um processo em que partículas com diferentes tamanhos, formas e densidades são separadas por ação da força da gravidade ou força centrífuga [56].

A compreensão dos mecanismos de funcionamento da mesa concentradora pode ser melhor entendida se for considerada separadamente a região com *riffles* e a região lisa. Na primeira, as partículas são alimentadas transversalmente, ocasionando um deslocamento das partículas para frente devido ao movimento assimétrico da mesa. Nos espaços entre os *riffles*, ocorre também a estratificação das partículas devido à dilatação causada pelo movimento assimétrico e pela turbulência da polpa, neste ponto, apresentando mecanismos de sedimentação

retardada e consolidação intersticial, assim, os minerais pesados e pequenos ficam mais próximos à superfície dos que os minerais grandes e leves.

A equação 1 (razão de sedimentação em queda impedida) representa o mecanismo de sedimentação retardada [57].

$$\frac{d_1}{d_2} = \left(\frac{\rho_{s2} - \rho_f}{\rho_{s1} - \rho_f} \right)^n \qquad \text{Equação 1}$$

onde:

d_1 e d_2= diâmetro das partículas dos materiais de densidades ρs_1 e ρs_2;

n= varia de 0,5 para partículas pequenas (< 0,1 mm) seguindo a Lei de Stokes a 1,0 para partículas grosseiras (> 5 mm) para a Lei de Newton;

ρ_f = densidade do fluido.

Pode-se observar pela equação 1 que para partículas menores que 0,1 mm (n= 0,5), a densidade tem menor influencia, e para partículas maiores do que 5 mm (n= 1), a densidade tem mais influencia na separação [56], favorecendo a separação por densidade.

O mecanismo de consolidação intersticial ocorre devido a formação de interstício entre partículas minerais de maior tamanho, onde ficam alojadas partículas minerais menores, proporcionando com isso uma liberdade de movimentação dessas partículas [56].

A Figura 17 [57] apresenta os efeitos dos mecanismos de sedimentação retardada e consolidação intersticial.

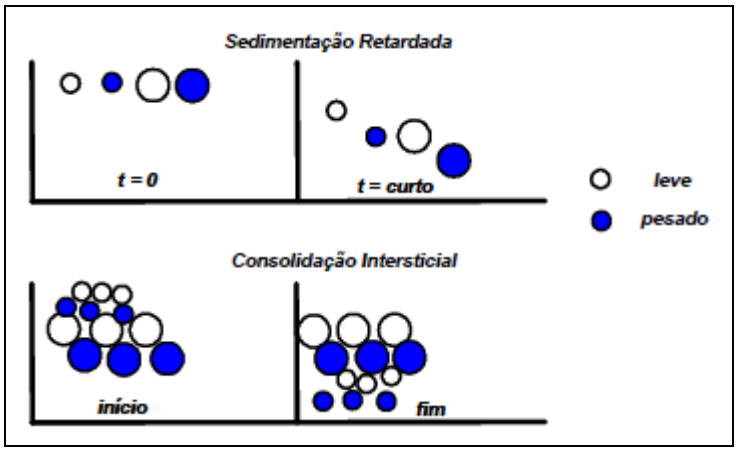


Figura 17- Efeitos dos mecanismos de concentração gravítica [57].

Devido à nova alimentação e água de alimentação que é transversal aos *riffles*, as camadas superiores são arrastadas. Como a altura dos *riffles* diminui ao longo do comprimento da mesa, as partículas finas e pesadas são postas em contato com a nova alimentação e água de alimentação, assim, passando por sobre os *riffles*.

A concentração final é realizada na região lisa da mesa, onde a espessura da camada de material é de apenas algumas partículas. Através do movimento assimétrico da mesa e da velocidade diferencial em escoamento laminar, ocorre o espalhamento dos minerais. A Figura 18 [56] apresenta esse espalhamento decorrente do movimento assimétrico da mesa e da velocidade diferencial em escoamento laminar.

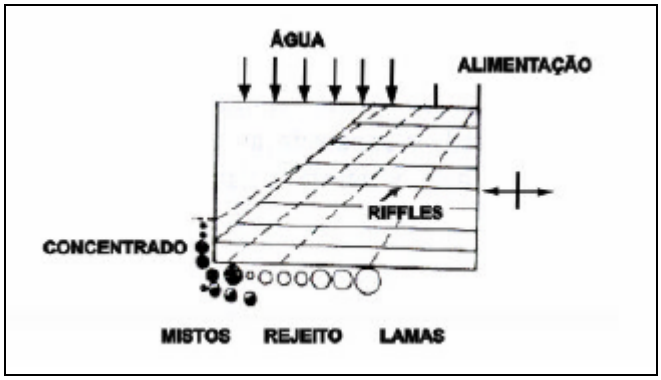


Figura 18- Espalhamento decorrente do movimento assimétrico da mesa e da velocidade diferencial em escoamento laminar [56].

A forma das partículas também interfere na separação. Partículas com forma de placas, por exemplo, tem dificuldade em deslizar. Partículas esféricas e densas podem se mover na lâmina de água em direção a área onde são coletados minerais mais leves [55].

A velocidade em que o equipamento utilizado para a realização dos ensaios pode chegar é de 60 pulsações por minuto. O controle da velocidade e amplitude de pulsação depende do tipo de minério a ser concentrado. Uma amplitude maior e uma menor velocidade são exigidas quando se trata de um minério com granulometria de alimentação mais grossa [55]. Quando o minério de alimentação apresenta uma granulometria mais fina, utiliza-se uma menor amplitude com uma maior velocidade de pulsação. Uma menor amplitude de pulsação também é utilizada quando a diferença de densidade entre o mineral mais pesado e o mais leve é por volta de um ou menor. Então, antes de iniciar uma operação de concentração em mesa concentradora, é necessário conhecer o mineral que irá ser tratado.

2.5.3 Ciclone

Ciclones são geralmente utilizados em aplicações nas quais pode-se citar circuitos fechados de moagem, na deslamagem de minérios para a flotação e na remoção de partículas menores do que 10 µm em operações de lavagem [58].

A alimentação desses equipamentos é na forma de polpa, tendo dois tipos de produtos, o *underflow* que é onde se concentram as partículas mais grossas da alimentação, e o *overflow* que é onde se concentram as partículas mais finas da alimentação.

Na realidade este tipo de classificação não é perfeito. No *underflow*, onde deveria somente existir partículas grossas, há a presença de partículas finas, assim como é o caso do *overflow* que também contém partículas mais finas.

Antes de iniciar a operação de classificação com ciclones, alguns parâmetros devem ser observados para que a separação seja a mais eficiente possível. Esses parâmetros são: viscosidade da polpa, pressão de alimentação, diâmetro do *vortex*, densidade das partículas, tamanho das partículas e diâmetro do *apex*. Porém, as variáveis mais importantes para a ciclonagem são a pressão de alimentação e a porcentagem de sólidos na alimentação [59].

A classificação em ciclones não ocorre em todas as partes do equipamento, mas sim em partes específicas. A Figura 19 [59] apresenta as regiões de um ciclone. Na parte A, são encontrados materiais que ainda não foram classificados. Na região B, estão presentes as partículas mais grosseiras do material alimentado que já foram classificados. Na região C são encontradas partículas já classificadas que estão aguardando a descarga pelo vortex, e na região D é a única região onde efetivamente ocorre a classificação.

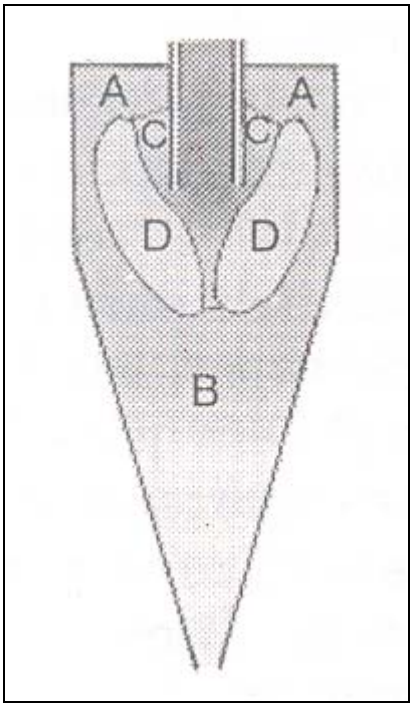


Figura 19- Regiões do ciclone [59].

Pontes [24] em seu trabalho utilizou ciclones na separação de ferro presente no resíduo de granito. O melhor resultado foi obtido com uma pressão de 27,58 kPa, diâmetro *vortex* 38,1 mm, diâmetro *Apex* 13,8 mm. Com estes parâmetros foi

possível uma redução do teor de ferro de 28,57% do resíduo de granito, ou seja, um concentrado ferroso com apenas 3,5% de ferro.

2.6 BRIQUETAGEM

Briquetagem é um método de aglomeração de partículas finas por meio de pressão, podendo ser ou não utilizado aglomerantes, obtendo assim, um produto compacto e com forma [60,61], possibilitando o transporte e armazenamento de materiais finos com maior economia.

As ligações de *Van der Waals* apresentam influência na união das partículas [60]. Para se obter briquete com resistência é necessário que as partículas estejam próximas umas das outras, assim, aumentando-se a força de união entre as partículas, produz-se briquetes com melhores características.

Aglomerantes são classificados em 3 grupos: tipo matriz, tipo filme ou película ou como aglomerantes químicos [62]. A Tabela 9 [63] apresenta esta classificação dos aglomerantes com alguns exemplos de materiais usados para cada tipo.

Tabela 9- Classificação dos aglomerantes [63].

Matriz	**Filme ou película**	**Aglomerantes químicos**
Carvão	Breu	Água de alcatrão
$Ca(OH)_2$ + Melaço	Asfalto de petróleo	Silicato de sódio
Silicato de sódio + CO_2	Cimento Portland	Lignosulfonatos

Os aglomerantes do tipo matriz envolvem as partículas em uma fase substancialmente continua. Sua quantia nos aglomerados pode chegar a 10% dependendo do material que esta sendo aglomerado. Por exemplo, para aglomerar finos de carvão com a utilização de aglomerante asfáltico, pode ser necessário à utilização de 8%, enquanto que para a aglomeração de minério de ferro com este mesmo aglomerante, é necessário apenas 2% [62].

Os aglomerantes do tipo filme ou película são geralmente utilizados na forma de soluções ou de dispersões. Uma desvantagem na utilização deste tipo de aglomerante é a baixa resistência mecânica a verde que os briquetes vão ter, mas após a secagem, este problema é solucionado [62] .

Para os aglomerantes químicos a escolha do tipo de aglomerante depende da extensão e das reações químicas entre os componentes e o aglomerante [62].

Cassola; Moraes e Tumolo Filho [64] fizeram estudos comparativos entre vários ligantes para a produção de briquetes de óxido de ferro. Os briquetes produzidos sem ligantes apresentaram uma resistência à compressão a seco de 2,45 kN. A adição de 2% em peso de melaço confere aos briquetes uma resistência à compressão da ordem de 3,92 kN. Já a resistência com 2% de cal é da ordem de 5,29 kN. Com relação à umidade, foi constatada que a umidade ideal é de 7%.

Também é comum o uso de lubrificantes na briquetagem. Lubrificantes têm a função de diminuir o coeficiente de fricção entre as partículas individuais do aglomerado ou entre a superfície do aglomerado com a superfície dos rolos de compressão. Eles podem ser utilizados tanto misturados com o material a ser aglomerado ou utilizado externamente nas superfícies de conformação [62].

2.6.1 Processo de briquetagem

Vários são os processos de briquetagem existentes. Porém, antes de iniciar o processo, é necessário que se encolha o método que melhor se ajuste ao material a ser briquetado. Quando a escolha não é bem feita, a prensagem pode não ser bem sucedida causando problemas em etapas seqüenciais.

Vários são os métodos utilizados para se proceder a pressão, são eles [61]:

- Briquetagem em prensas de rolos;
- Briquetagem por extrusão contínua;
- Briquetagem em prensas hidráulicas.

Desses processos citados, o que apresenta maior aceitação, é o método de briquetagem em prensas de rolos. Este processo é subdividido em quatro etapas que são: preparação, mistura, compressão e o tratamento térmico [60].

Na etapa de preparação, deve-se quantificar e caracterizar o tipo de briquete que se deseja produzir. Assim, podem-se quantificar os parâmetros que serão usados na produção. Por exemplo, para se saber a quantidade de aglomerantes que será usada no processo, deve-se saber a qualidade do material e a do aglomerante que irá ser usado. O tamanho das partículas é fundamental para a escolha do aglomerante. Quanto menores forem as partículas do material a ser briquetado, menor será a quantidade de aglomerante utilizado [60]. O tamanho das partículas deve ser de aproximadamente 3,3 mm para a produção de briquetes [60]. Cunha et al [65] diz que a granulometria para a fabricação de briquetes deve estar abaixo de 6,35 mm.

Após a escolha dos materiais que irão ser usados na briquetagem e da quantificação de cada um, a etapa que se segue é a mistura.

A compactação é realizada quando o material passa por entre os rolos que contém a forma desejada dos briquetes a ser produzido. As formas arqueadas são usadas para materiais em que a compactação é difícil, pois com este formato é possível se fazer uma distribuição mais homogênea da pressão.

Após a etapa de compactação, os briquetes ainda não possuem uma boa resistência, por isso, é comum se fazer o tratamento térmico. O tratamento se procede em se aquecer os briquetes e em seguida resfriá-los lentamente.

3 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo estudar os seguintes aspectos do resíduo gerado no corte de rochas ornamentais:

- Caracterização química e física do resíduo utilizado;
- Realização de ensaios utilizando separação magnética, mesa concentradora e ciclone para a recuperação de Fe metálico presente no resíduo;
- Produção de briquetes a partir do concentrado ferroso e realização de ensaios de resistência mecânica.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O resíduo de granito utilizado no presente estudo é procedente da etapa de desdobramento de blocos de granito, na qual foi utilizada granalha de aço. A amostra foi retirada por uma empresa situada no estado do Espírito Santo através do ciclone que é um equipamento instalado nas empresas para o reaproveitamento da água. Foram coletados cerca de 300 kg de amostra, que foram armazenados em tonéis, Figura 20, para que não ocorressem perdas e contaminações.

Figura 20- Amostra do resíduo coletado.

Feita a coleta, foi dado inicio à caracterização do resíduo para se iniciar as etapas de recuperação do Fe metálico presente no resíduo.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO

A amostra coletada foi submetida a ensaio de caracterização que envolveu a quantificação do teor de teor de Fe metálico assim como dos demais constituintes presentes nos resíduos tais como: SiO_2, Al_2O_3, CaO, K_2O, Na_2O, MgO e Fe_2O_3, além de difração de raios-X, análise granulométrica e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Para a realização da caracterização, uma alíquota foi retirada e encaminhada à secagem, realizada em chapa aquecedora, ilustrada na Figura 21. Após a secagem, o resíduo ficou na forma de pó, assim, foi feito um quarteamento (método de pilha cônicas) para a obtenção de alíquotas homogêneas. O quarteamento foi realizado até a obtenção de alíquotas de 20 g cada.

O método de quarteamento por pilha consiste em se fazer uma pilha cônica com toda a amostra e dividindo-a em várias frações até a obtenção de uma alíquota com a quantidade de amostra desejada. Após o quarteamento, foi dado início à caracterização das amostras.

Figura 21- Chapa de aquecimento utilizada na etapa de secagem

4.1.1 Métodos de caracterização do resíduo

Para a caracterização do resíduo, foram utilizadas análise química, análise granulométrica, difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

4.1.1.1 Análise química

A determinação do Fe metálico foi feita através de método volumétrico (titulométrico) no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP e a determinação dos teores de SiO_2, Al_2O_3, CaO, K_2O, Na_2O, MgO e Fe_2O_3 foi feita através da técnica de espectrometria de raios-X pelo Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da USP.

Para a realização da análise química pelo método volumétrico, inicialmente foi retirada uma alíquota de 1 g (com erro de 0,1 g) de cada amostra. Esta alíquota foi transferida para um béquer de 400 mL e foi adicionado 200 mL de água quente (70°C) e 30 mL de solução de sulfato de cobre ($CuSO_4$) a 10%. O béquer foi transferido para uma chapa aquecedora com agitação constante e foi deixada em aquecimento (temperatura de aproximadamente 100°C) até o volume reduzir para aproximadamente 70 mL. A solução então foi retirada da chapa e foi feita a filtragem utilizando um filtro de faixa preta. Na etapa de filtragem, é importante a lavagem da parede do béquer com água quente (70°C) para a retirada de todo o material preso. O filtrado foi recebido em outro béquer de 400 mL. Após a filtragem, foi adicionado 10 mL de solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 1:1 e alumínio metálico na forma de barras ou chapas (aproximadamente 10 g). O tamanho das barras ou chapas de alumínio devem ser o suficiente para que sejam retirados na filtragem.

A solução foi levada novamente à chapa aquecedora. Nesta etapa, a solução apresenta uma coloração azul devido ao sulfato de cobre. A solução foi deixada em aquecimento até a eliminação da coloração azul e então foi feita uma nova filtragem utilizando papel filtro de faixa preta para a retirada de possíveis precipitados e do alumínio metálico adicionado. O filtrado foi recebido em um erlenmeyer de 500 mL e deixada em repouso para o resfriamento até atingir a temperatura ambiente.

Após o resfriamento, foi realizada a titulação com solução de permanganato de potássio ($KMnO_4$) a 0,25 N. A titulação foi feita até a solução atingir uma coloração rosa pálida. Ao atingir esta coloração, a titulação foi encerrada e anotado o volume

gasto para efetuação do calculo do teor de Fe metálico presente na amostra. A equação 2 apresenta o calculo realizado para a determinação do teor de Fe metálico.

$$\%Fe = \frac{V1 \times 0{,}25 \times Fator \times 5{,}584}{p.a} \qquad \text{Equação 2}$$

onde:

% Fe: porcentagem em massa de Fe metálico presente na amostra;

V1: volume gasto (ml) de permanganato de potássio 0,25 N;

0,25: concentração da solução de $KMnO_4$ 0,25 N;

Fator: fator de correção do $KMnO_4$ 0,25 N;

5,584: miliequivalente grama do ferro x 100;

p.a.: peso da amostra.

A fim de se comprovar a precisão da análise química realizada para se determinar o teor de Fe metálico (método volumétrico), foram realizados testes com duas misturas de Fe metálico e alumina ambos em pó com teores de Fe metálico conhecidos (7 e 17% de Fe metálico), onde foram obtidos erros médios menores do que 5% (7,6 e 16,2% de Fe metálico).

4.1.1.2 Difração de raios-X

A difração de raios-X foi feita pelo Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da Escola Politécnica da USP, e teve como objetivo a determinação das principais fases cristalinas presentes no resíduo de granito.

Utilizou-se o equipamento da marca Philips, modelo MPD 1880, com radiação cobre Kα (λ= 1,5418A), potência de 40 kV e 40 mA. As condições de análise foram: passo de 2°, tempo de passo de 1s e intervalo de medida, em 2θ, de 10 a 70°. A Figura 22 ilustra o equipamento utilizado.

Figura 22- Equipamento de difração de raios-X.

4.1.1.3 Microscópio eletrônico de varredura

As imagens de microscópio eletrônico de varredura foram obtidas no Laboratório de Microscopia Eletrônica e de Força Atômica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP.

O Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado foi da marca Philips, modelo XL-30, que possui uma microssonda EDAX para análise espectrométrica de raios-X e também câmera EBSD (Electron Backscattered Diffraction) para difração de elétrons retro-espalhados. A Figura 23 apresenta o microscópio eletrônico utilizado.

Figura 23- Microscópio eletrônico de varredura.

As amostras que foram analisadas se encontravam na forma de pó, assim, o resíduo foi colocado em uma fita dupla face em porta amostra. Como o resíduo de granito é um material não-condutor, fez-se necessário o recobrimento das amostras com um material condutor, no caso, utilizou-se ouro.

4.1.1.4 Análise granulométrica

A análise granulométrica do resíduo de granito foi realizada no Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP. A analise foi feita a úmido e manualmente utilizando peneiras com as seguintes aberturas (mm): 0,217, 0,150, 0,105, 0,075, 0,053 e 0,044 mm (65, 100, 150, 200, 270 e 325 mesh).

Para a realização da análise granulométrica foi utilizada uma massa de resíduo de 2.205,23 g. Após a realização da análise granulométrica, foi realizada a análise química (método volumétrico) para a quantificação do teor de Fe metálico presente em cada fração obtida.

Foi utilizado também para a realização da análise granulométrica o equipamento Mastersizer 2000. Este equipamento utiliza a difração de raio laser para definir a distribuição do tamanho das partículas do material. O equipamento possui um sistema de detectores com luz vermelha, que detecta o espalhamento frontal, lateral e posterior. A fonte de luz vermelha é o laser néon de hélio, cujo comprimento de onda define a faixa de tamanho de partícula que o aparelho mede. No caso do equipamento utilizado na pesquisa, a faixa de tamanho de partícula esta compreendida entre 2 a 2.000 µm. A Figura 24 ilustra o equipamento utilizado nas análises granulométricas.

Figura 24- Equipamento Mastersizer 2000 utilizado nas análises granulométricas.

4.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Antes de se iniciar os ensaios de recuperação do Fe metálico (separação magnética, mesa concentradora e ciclone), foi necessária à preparação da amostra. Vale ressaltar que na preparação das amostras para os ensaios de ciclonagem não foi realizada a etapa de quarteamento, pois neste equipamento foi utilizada toda a amostra de uma única vez, os outros passos foram idênticos aos utilizados para a preparação das amostras nos equipamentos de separação magnética e mesa concentradora.

Inicialmente, foi feito o quarteamento da amostra para a obtenção de amostras homogêneas. Após o quarteamento, foi realizada a determinação da umidade de cada amostra em um medidor de umidade por infravermelho que pode ser visto na Figura 25. A determinação da umidade do resíduo foi realizada com o objetivo de se produzir uma polpa com 70% em massa de água e 30% em massa de resíduo.

Figura 25- Medidor de umidade por infravermelho.

Após a determinação da umidade, foi feita a pesagem de cada amostra e calculou-se a massa de água necessária para se produzir à polpa requerida. Após esta etapa, cada amostra foi levada aos equipamentos para se dar inicio aos processos de recuperação do Fe metálico.

4.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

4.3.1 Separação Magnética

O ensaio de separação magnética foi realizado no Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo e foi dividido em três etapas.

Na primeira etapa, foi realizada a separação magnética na polpa (30% em massa de resíduo e 70% em massa de água) com auxilio de um separador magnético a úmido de alta intensidade (Figura 26) onde foi utilizada uma matriz ferromagnética do tipo Jones. Nesta etapa, foi utilizado apenas o campo magnético remanescente do equipamento.

Para a obtenção do campo magnético remanescente, o equipamento foi deixado em funcionamento por um período de 10 minutos. Após este tempo, o equipamento foi desligado, restando apenas um campo remanescente de baixa intensidade, na qual foi utilizada na separação magnética. Vale ressaltar que a cada período de 10 minutos o equipamento era novamente ligado para a obtenção de um novo campo magnético remanescente.

Figura 26- Equipamento de separação magnética a úmido utilizado nos ensaios.

A fração magnética obtida no separador magnético de alta intensidade foi levada para a segunda etapa do processo, enquanto que o material não magnético foi seco em uma chapa de aquecimento e quarteado para realização da análise química pelo método volumétrico para a determinação do teor de Fe metálico. Este material foi denominado concentrado granítico.

Na segunda etapa, o material magnético procedente da primeira etapa foi levado para uma nova separação magnética, só que desta vez, a separação magnética foi feita manualmente utilizando um imã de terras raras.

Finalizada a etapa de separação magnética com o imã de terras raras, deu-se inicio a ultima etapa do processo de separação magnética na qual o material magnético obtido com o imã de terras raras foi submetido à separação magnética com um imã comum (ferrítico). O material obtido nesta ultima separação magnética foi nomeado de concentrado ferroso.

O concentrado ferroso obtido foi seco em uma chapa aquecedora, pesado e quarteado para a realização da análise química pelo método volumétrico para a determinação do teor de Fe metálico.

4.3.2 Mesa Concentradora

Os ensaios de concentração do Fe metálico na mesa concentradora foram realizados no Instituto Federal do Espírito Santo (IFES). Após a chegada da polpa preparada com 70% em massa de água e 30% em massa de resíduo, esta foi transferida para o alimentador da mesa concentradora para iniciar o processo de homogeneização, que foi realizado durante 5 minutos. A homogeneização foi realizada através de um equipamento acoplado à mesa que consiste em um motor com uma hélice acoplada na extremidade do eixo. A Figura 27 apresenta a vista lateral do alimentador e homogeneizador, e a Figura 28 apresenta o sistema de homogeneização em operação.

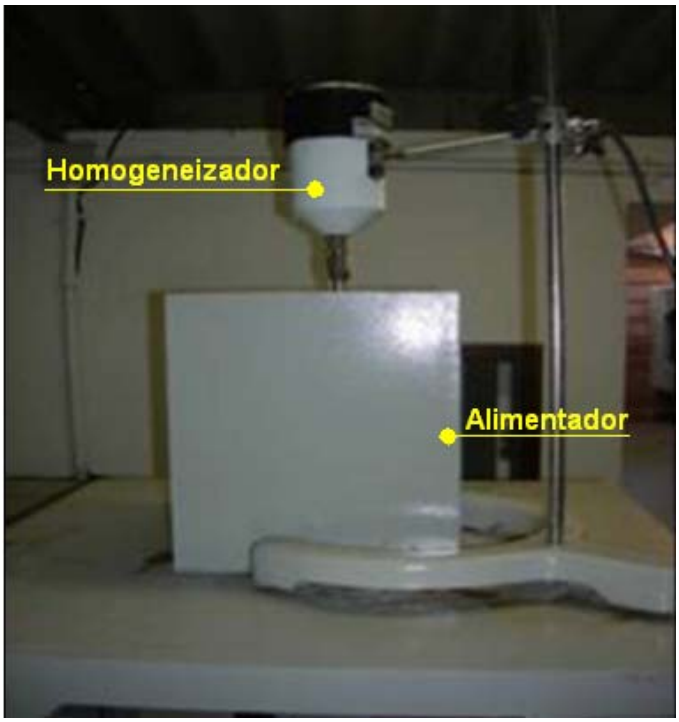


Figura 27- Vista lateral do alimentador e do homogeneizador.

O objetivo da instalação do alimentador é de armazenar o resíduo e alimentar a mesa concentradora com uma vazão constante e o homogeneizador tem a função de não deixar o resíduo sedimentar no fundo do alimentador.

Figura 28- Sistema de homogeneização em operação.

Foram realizadas variações nos parâmetros do equipamento com o intuito de se aperfeiçoar e definir os melhores parâmetros de concentração para o material em estudo. Foram realizadas variações na inclinação da mesa, freqüência de oscilação e vazão de alimentação. A Figura 29 ilustra a mesa concentradora utilizada nos ensaios de concentração.

Figura 29- Mesa concentradora utilizada nos ensaios.

Na Tabela 10 são apresentados os parâmetros utilizados para a realização dos ensaios de mesa concentradora.

Tabela 10- Parâmetros utilizados nos ensaios de mesa concentradora.

Ensaio	Inclinação da mesa	Freqüência de oscilação	Vazão de água (L/min)
1	7,7°	30	4
2	7,7°	50	
3	5,3°	30	
4	7,7°	30	8
5	7,7°	20	

Ao término de cada ensaio, os produtos obtidos foram secos em chapa aquecedora, pesados e em seguida realizou-se o quarteamento de cada amostra (método de pilha) para a obtenção de alíquotas homogêneas para a determinação do teor de Fe metálico.

4.3.3 Ciclonagem

Os ensaios de ciclonagem foram realizados no Laboratório de Resíduos e Áreas Contaminadas localizado no IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo). Foi utilizado um ciclone da marca CIMAQ S.A. cuja dimensões são apresentadas na Figura 30. Na Figura 31 é ilustrado o ciclone utilizado nos ensaios.

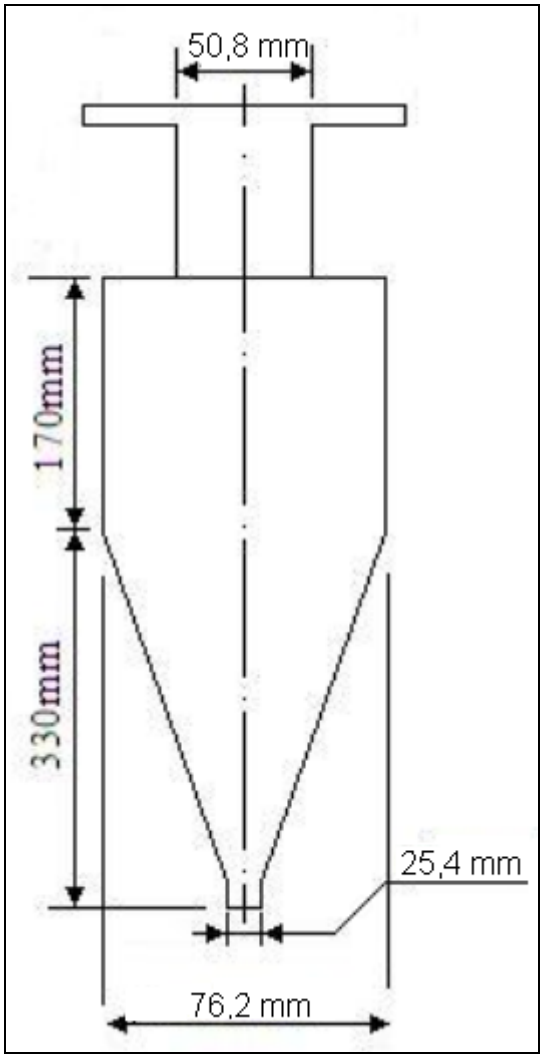


Figura 30- Dimensões do ciclone utilizado.

Figura 31- Ciclone utilizado nos ensaios.

Com a chegada da polpa já preparada (30% em massa de resíduo e 70% em massa de água), esta foi transferida para a caixa de alimentação do ciclone, onde ocorreu a homogeneização da polpa.

A homogeneização da polpa foi feita por dois mecanismos, sendo o primeiro obtido pelo fluxo causado pelo retorno do *underflow* e *overflow* e o segundo produzido pelo fluxo de retorno causado pela bomba de alimentação do ciclone. A Figura 32 apresenta o fluxo causado pelo retorno do *underflow* e *overflow.*

Figura 32- Fluxo causado pelo retorno do *underflow* e *overflow*.

Na saída do *underflow* e do *overflow* do ciclone foram adaptadas mangueiras para que o fluxo de saída de cada um voltasse para a caixa de alimentação, causando assim um sistema contínuo.

O período de homogeneização inicial na caixa de alimentação foi de 10 minutos, e após este tempo, foi dado inicio ao processo ciclonagem.

O tempo para a retirada das amostras foi definido a partir do tempo gasto para se obter 5 litros de amostra do *underflow*. A retirada da amostra foi feita utilizando baldes com capacidade de 5 litros, onde estes eram colocados no fluxo de retorno do *overflow* e *underflow* ao mesmo tempo, e após a obtenção das amostras requeridas, eram retirados ao mesmo tempo. Assim, para cada ensaio, o tempo de retirada de amostra variou entre 34 a 49 segundos.

Ao término de cada ensaio, a polpa foi deixada em homogeneização durante 5 minutos antes da nova retirada de amostras com variação de parâmetros. Nos ensaios variou-se apenas a pressão de alimentação. Para medir a pressão de alimentação do ciclone, foi instalado um manômetro na entrada do equipamento. A

Tabela 11 apresenta os valores dos parâmetros utilizados nos ensaios de ciclonagem.

Tabela 11- Parâmetros utilizados nos ensaios de ciclone.

Ensaios	Diâmetro do Vortex (mm)	Diâmetro do Apex (mm)	Pressão (kPa)
1	50,8	25,4	24,5
2			14,7
3			9,8
4			4,9
5			0

Ao término, as amostras de *underflow* e *overflow* obtidas foram submetidos aos mesmos procedimentos do ensaio anterior.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS OBTIDOS

Após a realização dos ensaios para a recuperação do Fe metálico presente no resíduo de rochas ornamentais através de separação magnética, mesa concentradora e ciclone, os produtos obtidos em cada equipamento foram submetidos a análises químicas volumétrica para a determinação do teor de Fe metálico. Este passo teve por objetivo determinar o produto obtido com maior teor de Fe metálico e o produto com menor teor de Fe metálico. Os ensaios de caracterização foram: microscópio eletrônico de varredura, difração de raios-X e análise granulométrica.

4.5 BRIQUETAGEM

Para a confecção dos briquetes, foi utilizada uma quantidade de 100 kg de concentrado ferroso. Foi adotado o processo de briquetagem com uso de aglomerante, no qual foi utilizado 2% em massa de cal hidratada. Foi adicionada também água na quantidade de 7% em massa. A Figura 33 apresenta o fluxograma da produção de briquetes.

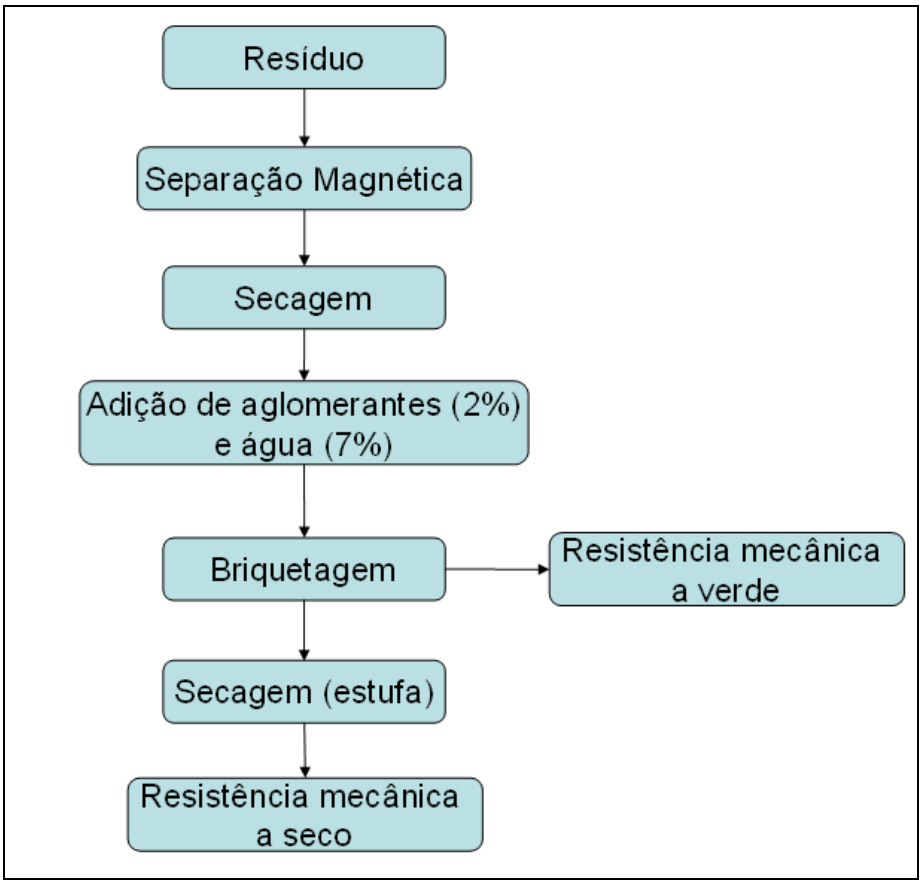


Figura 33- Fluxograma da produção de briquetes.

Após a separação magnética, o concentrado ferroso foi colocado em um recipiente (big *bag*) onde ficava até a secagem do concentrado que ocorria no próprio ambiente. Após a secagem, o *big bag* contendo o concentrado ferroso foi levado à confecção dos briquetes.

A confecção dos briquetes foi realizada no Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), onde foi utilizada uma briquetadeira de rolos feita pela SERVIGRAN, modelo HI.BRLC.5463 que pode ser vista na Figura 34. Os briquetes produzidos apresentam dimensões médias de 40x35x15 mm.

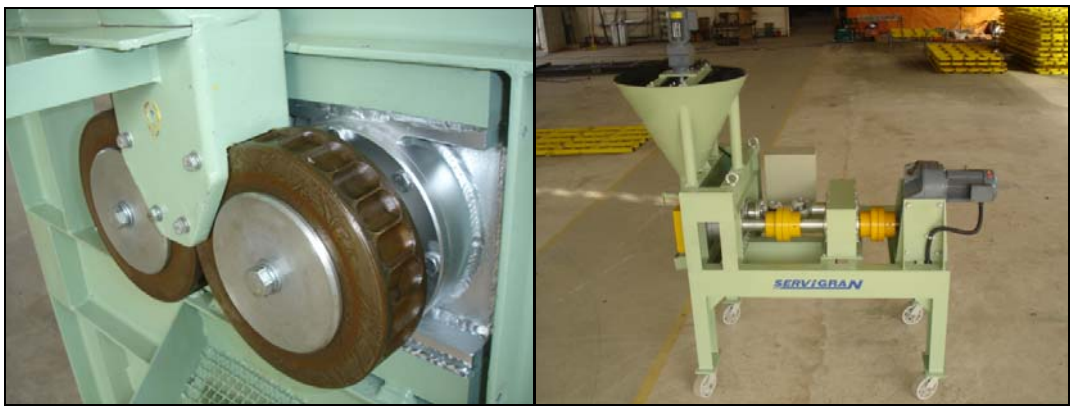


Figura 34- Briquetadeira de rolos utilizada na fabricação dos briquetes.

Feita a adição do aglomerante e da água no concentrado ferroso, foi realizada a homogeneização e após a homogeneização foi dado inicio ao processo de confecção dos briquetes. Foi utilizada uma força de compactação de 350 kN.

Após a confecção, três briquetes foram escolhidos ao acaso para a realização dos ensaios de resistência mecânica a verde. Para isso, foi utilizada um prensa da marca Kratos dotada de célula de carga da marca EMIC (modelo CCE1KN) e anotada a força de ruptura em quiloNewton (kN). A Figura 35 apresenta a prensa utilizada nos ensaios mecânicos.

Figura 35- Prensa mecânica utilizada nos ensaios de resistência mecânica.

Outros três briquetes foram escolhidos ao acaso e foram levados à secagem em estufa a uma temperatura de 105°C durante um período de 24 horas. Após o período de secagem, os briquetes foram resfriados ao ar. Realizado o resfriamento, os briquetes foram levados aos ensaios de resistência mecânica que ocorreu do mesmo modo utilizado para se determinar a resistência mecânica a verde.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO

A caracterização do resíduo foi feita utilizando as seguintes técnicas:

- Análise química por método volumétrico para determinação do Fe metálico e fluorescência de raios-X para determinação dos óxidos;
- Microscopia eletrônica de varredura;
- Difração de raios-X;
- Análise granulométrica.

5.1.1 Análise química

Foi realizada análise química na amostra de resíduo de granito. A Tabela 12 apresenta o resultado obtido na análise química.

Tabela 12- Análise química do resíduo de granito.

Elementos	% em massa
SiO_2	65,9
Al_2O_3	13,4
Fe_2O_3	1,4
MgO	1,0
CaO	4,2
Na_2O	2,6
K_2O	4,4
Fe	4,8
Perda ao fogo	2,3

Pela análise química pode-se verificar o alto teor de SiO_2 (65,9%) por se tratar do principal constituinte do granito. Fujimori [66] e Williams; Turner e Gilbert [26] apresentam várias classificações para rochas baseadas em suas composições. Em suas classificações, os autores [26,66] consideram que as rochas ígneas podem ser

classificadas com relação ao teor de sílica. De acordo com esta classificação, o granito estudado é classificado como rocha intermediária por apresentar um teor de sílica entre 52 a 66% (65,9% de SiO_2).

Nota-se, também, a presença de sódio e potássio na composição química dos resíduos. Estes são provavelmente provenientes dos feldspatos encontrados no granito[45,67]. Nota-se a presença de Fe metálico que é proveniente das granalhas de aço utilizadas na etapa de desdobramento dos blocos em chapas.

Segundo Buzzi[68], na utilização do resíduo de granito em construção civil, como por exemplo, produção de argamassas, tijolos, concreto, elementos de concreto e pavimentação asfáltica, o Fe metálico pode causar problemas, uma vez que quando oxida, causa uma expansão, podendo ocasionar fissuras nos produtos confeccionados com este resíduo.

5.1.2 Difração de raios-X

Foi realizada a análise por difração de raios-X na amostra de resíduo de granito. A Figura 36 apresenta um difratograma da amostra estudada.

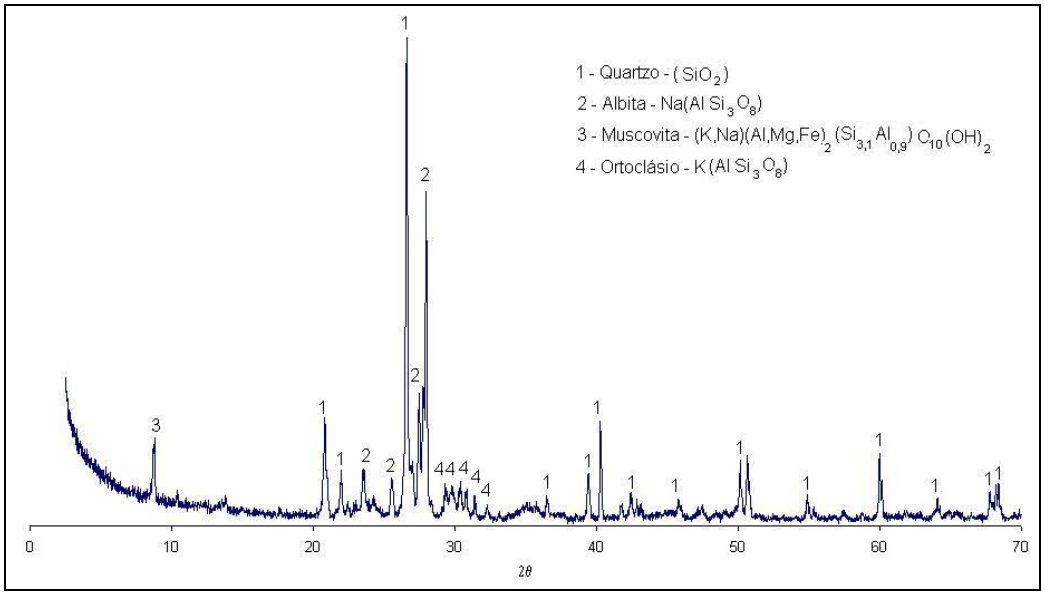


Figura 36- Difratograma do resíduo de granito.

Foi possível a determinação de picos de quartzo (SiO_2), albita ($Na(AlSi_3O_8)$), ortoclásio ($K(AlSi_3O_8)$) e muscovita ($(K,Na)(Al,Mg,Fe)_2(Si_{3,1}Al_{0,9})O_{10}(OH)_2$). A albita e o ortoclásio são minerais pertencente à família dos feldspatos, e a muscovita é um mineral pertencente à família das micas[69]. De acordo com Carvalho; Ribeiro e Carrisso [67], o quartzo, os feldspatos e as micas são os minerais essencialmente encontrado em granitos.

5.1.3 Microscopia eletrônica de varredura

A Figura 37 apresenta uma imagem obtida pelo microscópio eletrônico de varredura do resíduo de granito. Foram feitas análises de EDS (Energy Disperse Spectroscopy) de várias regiões do espectro. Pode-se comprovar pelo espectro apresentado (Figura 38), a presença de Fe metálico no resíduo. Este Fe metálico é proveniente da granalha de aço que é adicionada na preparação da polpa abrasiva na etapa de desdobramento dos blocos. Pode-se observar também pela Figura 39 a predominância de Si. Como o principal constituinte do granito é o quartzo (SiO_2), o pico de oxigênio é esperado no espectro. Os picos de K, Al, Mg e Na são decorrentes da albita, ortoclásio e muscovita.

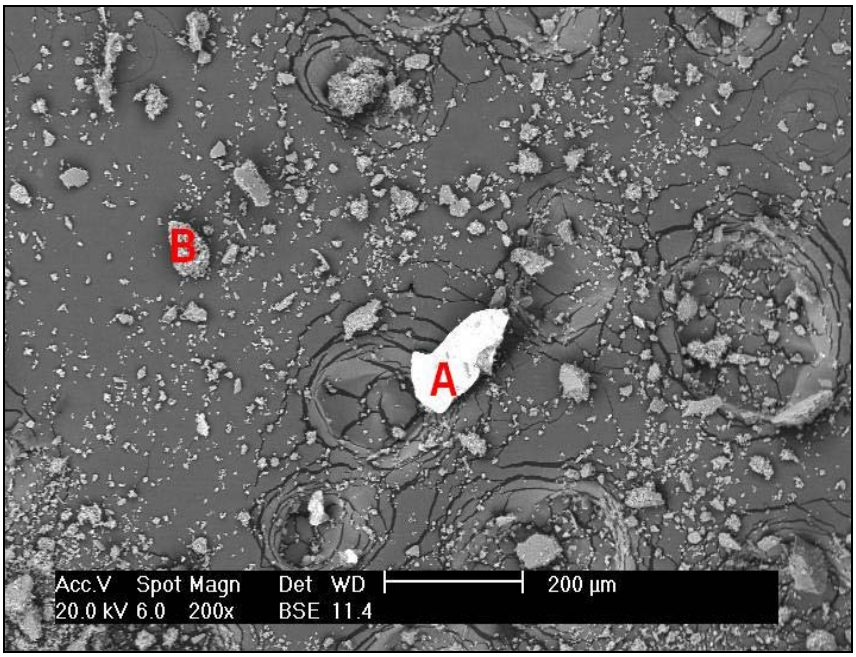


Figura 37- Imagem de elétrons retro-espalhados do resíduo de granito.

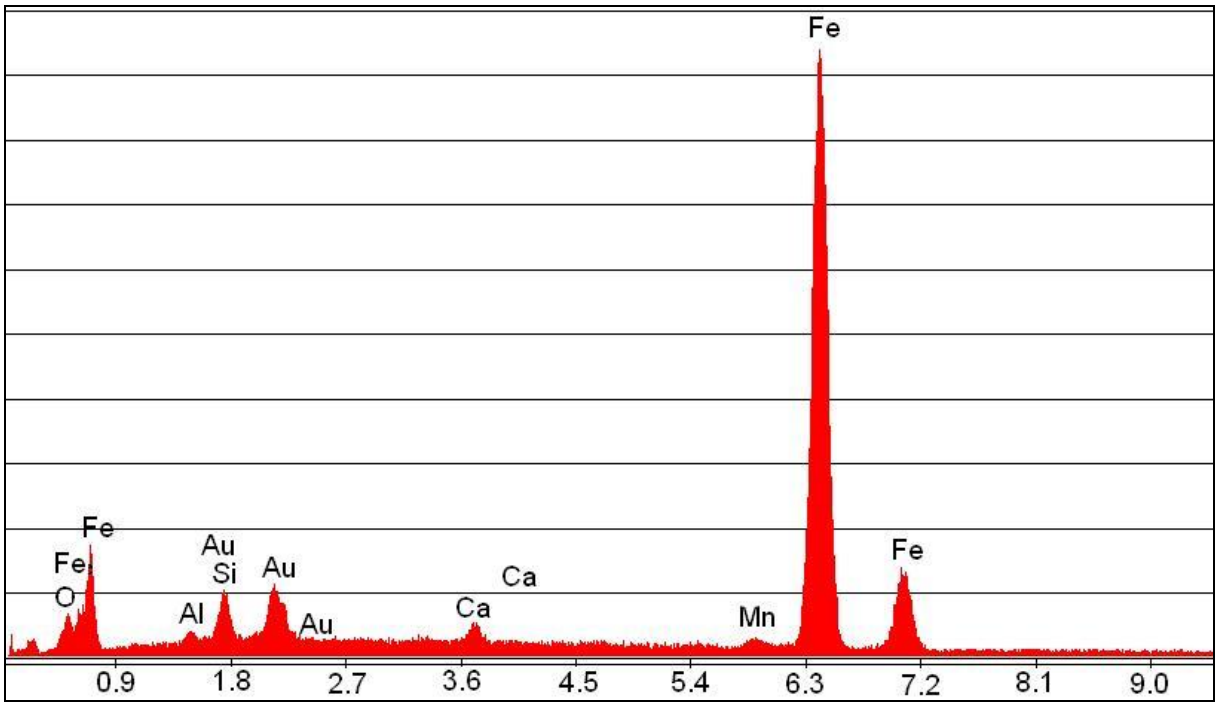


Figura 38- Espectro do ponto A da Figura 37.

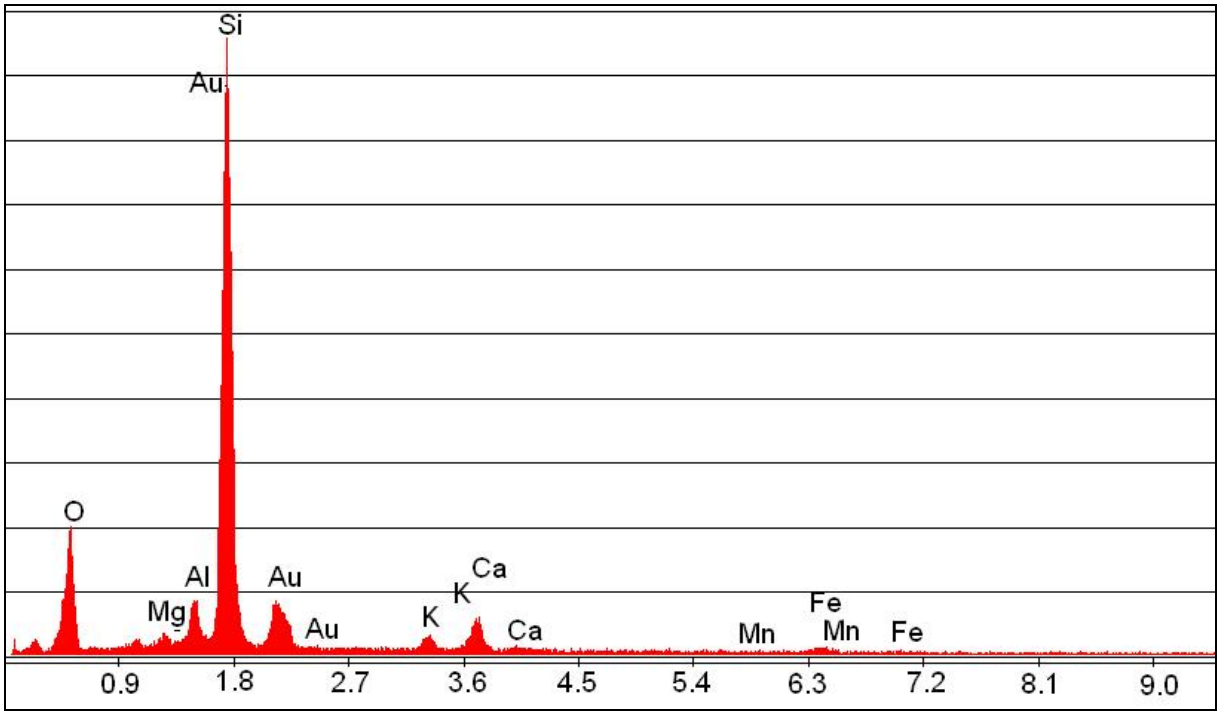


Figura 39- Espectro do ponto B da Figura 37.

5.1.4 Análise granulométrica

A Tabela 13 apresenta o resultado da análise granulométrica do resíduo de granito. Também é apresentado o teor de Fe metálico presente nas frações retidas em cada peneira. Na Figura 40 é apresentado o gráfico porcentagem acumulada versus abertura (mm) do resíduo de granito e na Figura 41 é apresentado o gráfico da porcentagem acumulada versus abertura (mm) do Fe metálico presente no resíduo.

Tabela 13- Análise granulométrica do resíduo de granito.

Peneiras (mm)	**+0,217**	**- 0,217 +0,150**	**- 0,150 +0,105**	**- 0,105 +0,075**	**- 0,075 +0,053**	**- 0,053 +0,044**	**- 0,044**
Massa de resíduo retida (g)	13,08	18,49	50,84	75,30	134,40	92,22	1820,90
% resíduo retido	0,6	0,8	2,3	3,4	6,1	4,2	82,6
% Fe Metálico em cada fração	12,1	14,7	22,9	22,9	17,0	14,4	2
Massa Fe metálico(g) em cada fração	1,58	2,72	11,63	17,22	22,83	13,26	35,69
Acumulado % Fe metálico retida	1,5	4,1	15,1	31,6	53,3	66,0	100

Pode-se observar na Tabela 13 que a maior parte do resíduo de granito (82,6%) está abaixo de 0,044 mm e apenas 15,1% do Fe metálico presente no resíduo de granito está situado acima de 0,105 mm.

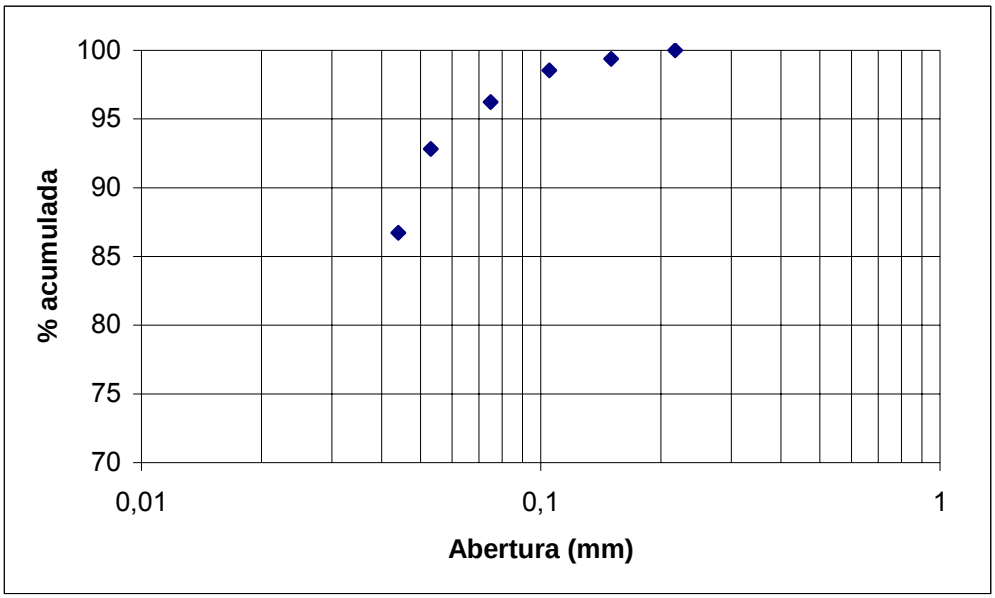


Figura 40- Análise granulométrica do resíduo de granito.

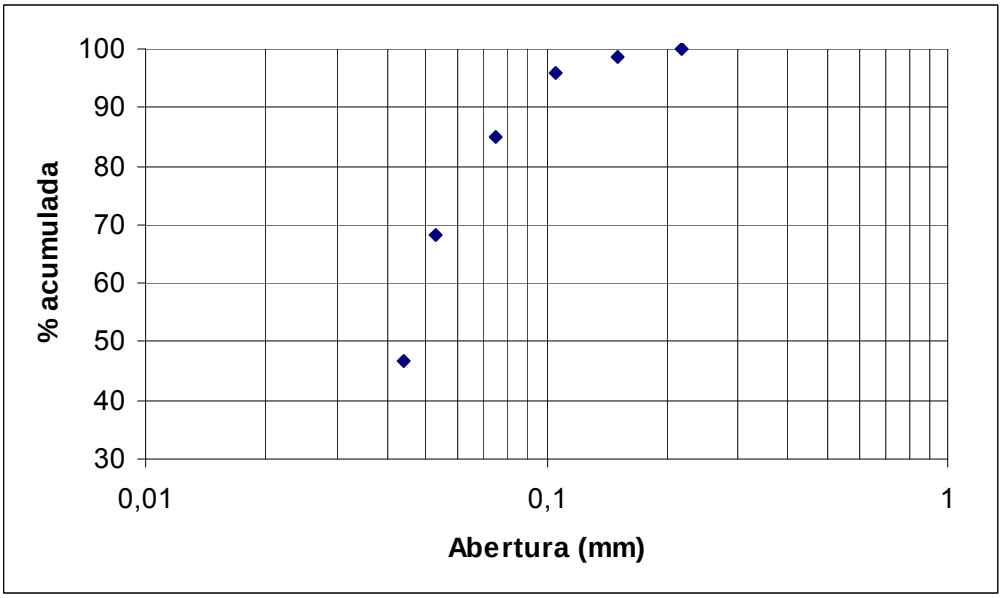


Figura 41- Análise granulométrica do Fe metálico presente no resíduo.

Nota-se na Tabela 13 que o Fe metálico distribui-se de forma uniforme em quase todas as faixas granulométricas, exceto na fração mais fina onde o teor observado foi de 2%. Todavia, apesar da baixa quantidade de ferro na porção mais fina do resíduo, como esta fração possui a maior quantidade em peso de toda a amostra, cerca de 82%, a quantidade de ferro presente na mesma corresponde a mais da metade de todo o ferro contido na amostra. Assim, não é possível concentrar-se o ferro por classificação granulométrica.

A Figura 42 apresenta a análise granulométrica feita com o equipamento Mastersizer 2000.

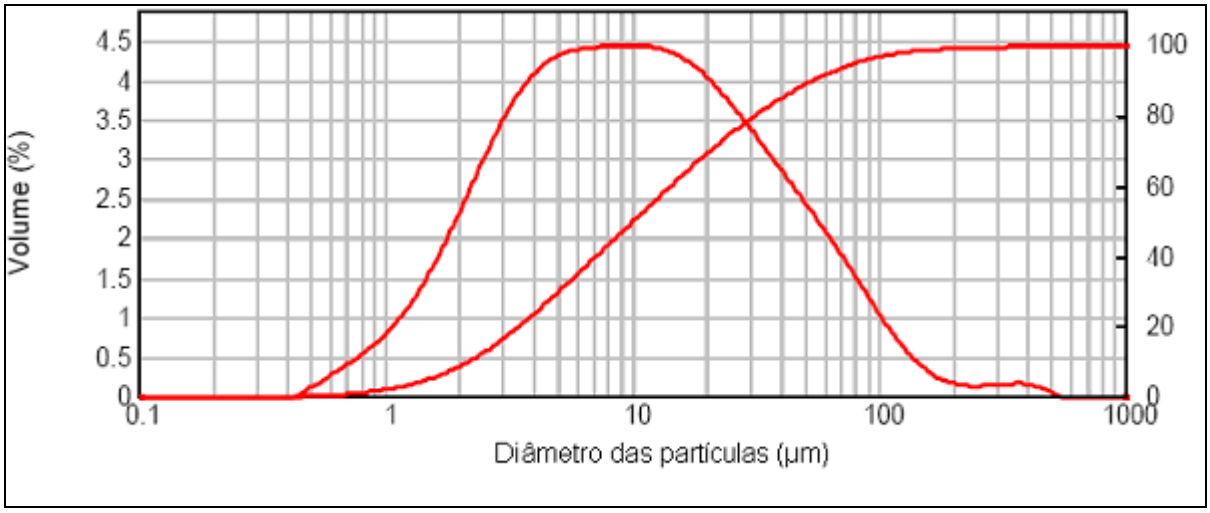


Figura 42- Análise granulométrica do resíduo.

A granulometria do resíduo está situada entre 0,50 a 563,67 µm, e 4% do resíduo esta acima de 100 µm. Estes valores obtidos confirmam os resultados obtidos pela análise granulométrica realizada com peneiras.

5.2 RECUPERAÇÃO DO FE METALICO

5.2.1 Separação magnética

Para a realização dos ensaios de separação magnética, inicialmente foi utilizado um separador magnético a úmido de alta intensidade, no qual foi utilizado somente o campo magnético remanescente do equipamento.

No concentrado granítico obtido nesta etapa de separação magnética, foi obtido um total de 1.942,8 g de amostra, o que representou 91,8% da amostra inicial. Este concentrado granítico apresentou um teor de 0,6% de Fe metálico. O restante da amostra (8,2%) foi atraído pelo equipamento de separação magnética.

Depois de realizada a separação magnética com campo magnético remanescente, o material magnético obtido foi encaminhado para uma nova separação magnética, desta vez utilizando um imã de mão de terras raras.

Para finalizar o ensaio de separação magnética, o material magnético obtido na separação com o imã de terras raras foi levado a uma nova separação magnética, desta vez, utilizando um imã comum (imã ferrítico). Nesta etapa, o concentrado ferroso obtido apresentou uma massa total de 94,4 g, o que representa 4,5% da amostra inicial. Este concentrado ferroso apresentou um teor de Fe metálico de 93%.

O balanço de massas do processo de separação magnética resulta num concentrado com 93% Fe metálico o que representa uma recuperação de 88% do ferro contido na amostra. Por outro lado foi produzido um concentrado granítico com 0,6% de Fe metálico.

A Figura 43 apresenta o fluxograma dos resultados obtidos em cada etapa do ensaio de separação magnética.

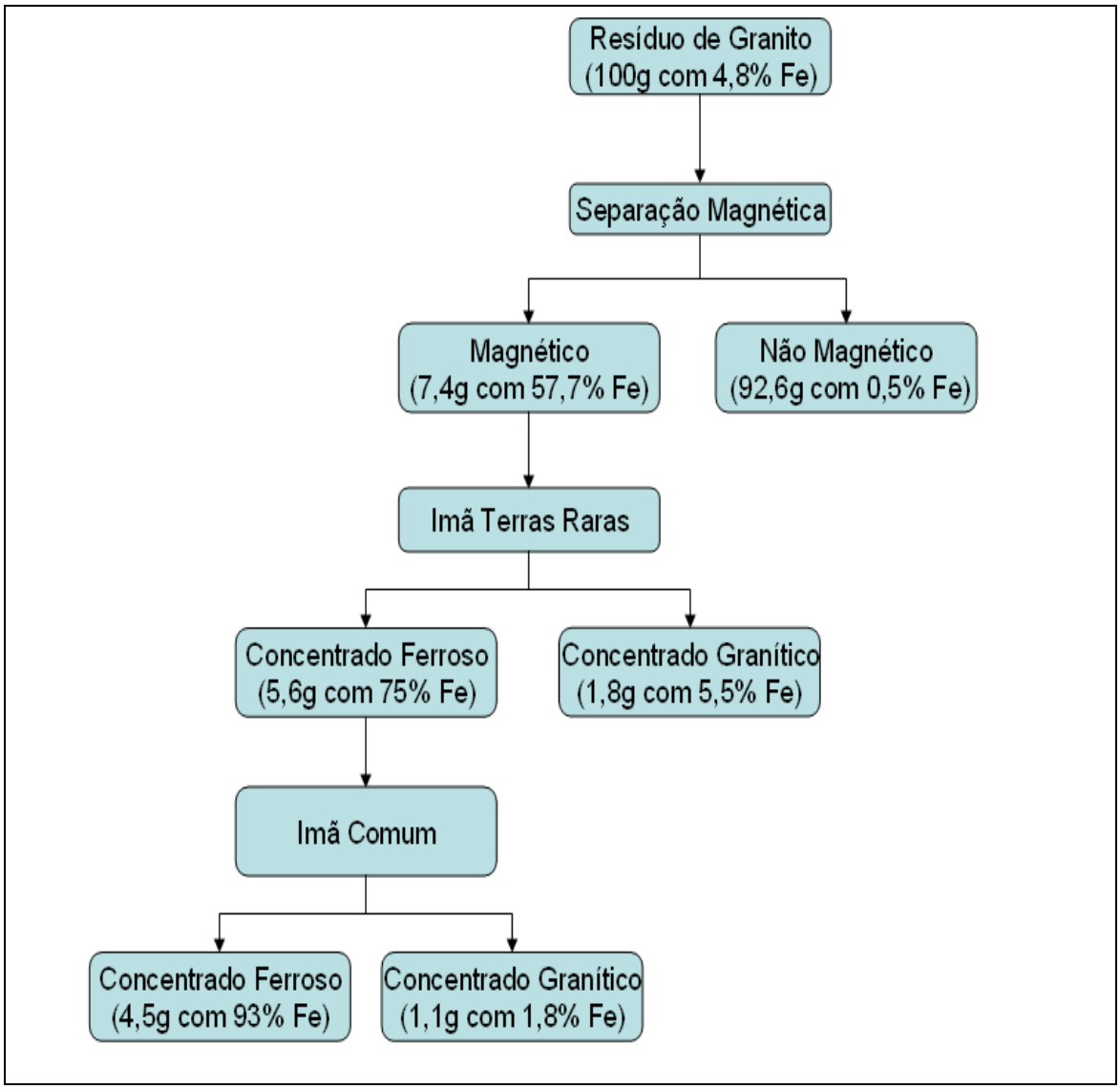


Figura 43- Fluxograma dos resultados obtidos em cada etapa da separação magnética.

Para facilitar a elaboração do fluxograma, foi considerada uma massa inicial de 100 g de resíduo de granito. Assim, o fluxograma apresenta o valor da massa obtido em cada etapa em relação à massa inicial do resíduo e da porcentagem de Fe metálico obtido em cada etapa.

Ao final do processo, o concentrado granítico obtido em cada etapa foi misturado, e através de balanço de massa, foi observado que o concentrado granítico obtido no processo correspondeu a 95,5% da massa inicial do resíduo.

5.2.2 Mesa Concentradora

Foram realizados ensaios em mesa concentradora nos quais foram realizadas variações nos parâmetros do equipamento. Foram feitas variações no ângulo de inclinação, oscilação da mesa e água de lavagem. A amplitude de vibração foi mantida constante. A Tabela 14 apresenta os valores obtidos na separação em mesa concentradora.

Tabela 14- Resultados obtidos utilizando mesa concentradora.

	Concentrado Ferroso			Concentrado Granítico		
Ensaios	**Massa (g)**	**%(Massa)**	**% Fe metálico**	**Massa (g)**	**%(Massa)**	**% Fe metálico**
1	216,67	8,58	13,7	2.310	91,42	4
2	76,11	7,23	11,4	976,5	92,77	4,4
3	206,03	22,38	6,69	714,5	77,62	4,3
4	224,49	17,39	5,9	1.066,64	82,61	4
5	68,43	6,37	7,6	1.006,07	93,63	4,7

O Fe metálico presente na Tabela 14 é devido a granalha de aço adicionada à polpa abrasiva para o corte dos blocos. Na separação magnética foi possível a obtenção de um concentrado ferroso com 93% de Fe metálico, enquanto na mesa concentradora foi obtido um concentrado ferroso com no máximo de 13,7% de Fe metálico. Este valor de 13,7% de Fe metálico foi obtido quando foi utilizada uma inclinação de 7,7° e a mesa operando com uma freqüência de oscilação de 30 oscilações por minuto juntamente com uma vazão de água de 4 L/min.

Nota-se que ao se aumentar a freqüência de oscilação da mesa de 30 para 50 oscilações por minuto ocorreu uma diminuição do teor de Fe metálico no concentrado ferroso de 13,7% para 11,4%. O mesmo fato ocorreu quando foi feita uma diminuição do ângulo de inclinação da mesa. O aumento da vazão da água de lavagem também ocorreu de modo a prejudicar a recuperação do Fe metálico do resíduo de granito.

Nos ensaios realizados na mesa concentradora, foi possível a obtenção de um concentrado granítico com apenas 4% de Fe metálico.

A granulometria do resíduo pode ser utilizada para justificar a ineficiência da concentração em mesa concentradora. De acordo com Pontes[24] o material fino é arrastado pelo fluxo de água para o concentrado. Como o material fino do resíduo é composto principalmente por óxidos, é de se esperar que a concentração feita em mesa concentradora para o material em estudo seja ineficiente.

Pontes[24], em seus ensaios em mesa concentradora, obteve um concentrado ferroso com 3,2% de Fe metálico, o que representou uma redução de 34,7% de Fe metálico do resíduo estudado.

5.2.3 Ciclone

Os ensaios de ciclonagem foram feitos visando-se recuperar o Fe metálico presente no resíduo de granito. Porém, os resultados não foram satisfatórios, uma vez que foi possível a obtenção de um produto com no máximo 7,3% de Fe metálico. Na Tabela 15 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de ciclonagem.

Tabela 15- Resultados obtidos nos ensaios em Ciclone.

	Underflow			***Overflow***		
Pressão de alimentação (kPa)	**Massa(g)**	**%(Massa)**	**% Fe metálico**	**Massa(g)**	**%(Massa)**	**% Fe metálico**
24,5	1.784,6	34,55	5,0	3.381,2	65,45	4,7
14,7	1.630,1	32,88	6,5	3.327,4	67,12	4,0
9,8	1.687,7	33,71	6,0	3.318,1	66,29	4,2
4,9	1.746,9	33,43	7,3	3.479,3	66,57	3,5
0	1.689,8	38,21	6,2	2.732,7	61,79	3,9

Comparado com o ensaio de separação magnética e de mesa concentradora, o ciclone apresentou os piores resultados na recuperação de Fe metálico, uma vez que na separação magnética foi possível à obtenção de um concentrado ferroso com 93% de Fe metálico e na mesa concentradora foi obtido um concentrado ferroso com até 13,7% de Fe metálico. Enquanto que no ciclone foi possível a obtenção de um produto com apenas 7,3% de Fe metálico.

Pontes[24] utilizou ciclonagem para a remoção do Fe metálico do resíduo de granito. Partindo de uma amostra com 4,9% de Fe metálico obteve um concentrado ferroso com no máximo 3,5% de Fe metálico, porém, utilizou diâmetros de *vortex* e *apex* diferentes ao utilizados nestes ensaios. De acordo com Chaves[59] o diâmetro do *vortex* e *apex* influencia no diâmetro do corte do ciclone, assim, justificando a diferença dos resultados obtidos.

5.3 CARACTERIZAÇÃO DO CONCENTRADO FERROSO

Para a realização dos ensaios de caracterização foi utilizado o concentrado ferroso obtido na separação magnética. Foi adotado este concentrado, pois através deste ensaio foi encontrado o maior teor de Fe metálico (93%) juntamente com um concentrado granítico com menor teor de Fe metálico (0,6%). A Figura 44 mostra o concentrado ferroso obtido na separação magnética do resíduo de granito.

Figura 44- Concentrado ferroso obtido na separação magnética do resíduo de granito.

A caracterização do concentrado ferroso obtido na separação magnética foi realizada através de microscopia eletrônica de varredura, difração de raios-X e análise granulométrica.

5.3.1 Microscopia eletrônica de varredura

A Figura 45 apresenta a imagem obtida pelo microscópio eletrônico de varredura na amostra de concentrado ferroso obtido na separação magnética do resíduo de granito. Análises de EDS foram realizadas de várias regiões do espectro. A Figura 46 apresenta o espectro de EDS do concentrado ferroso.

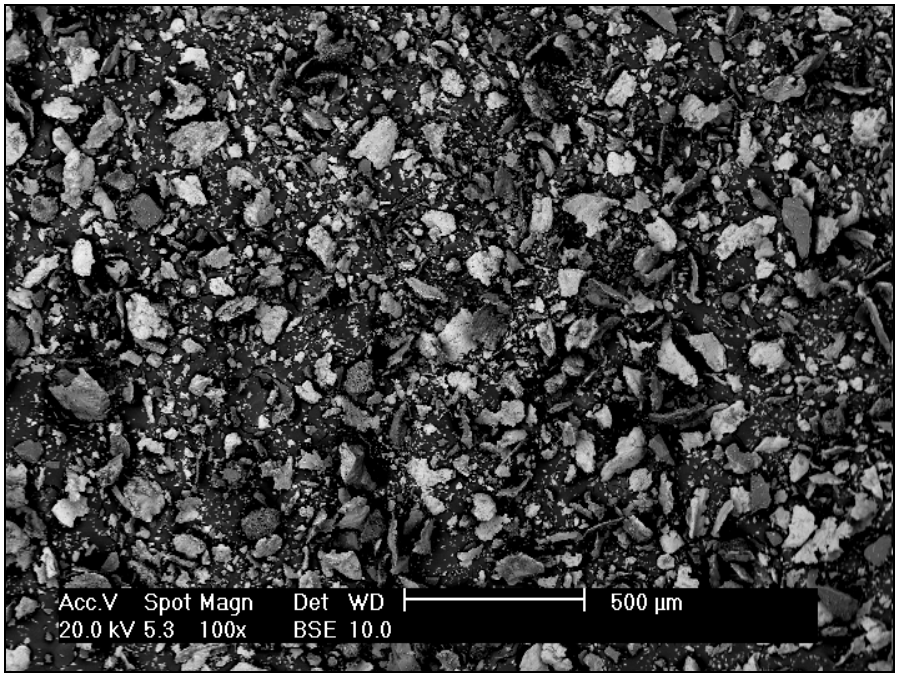


Figura 45- Imagem de elétrons retro-espalhados do concentrado ferroso obtido na separação magnética.

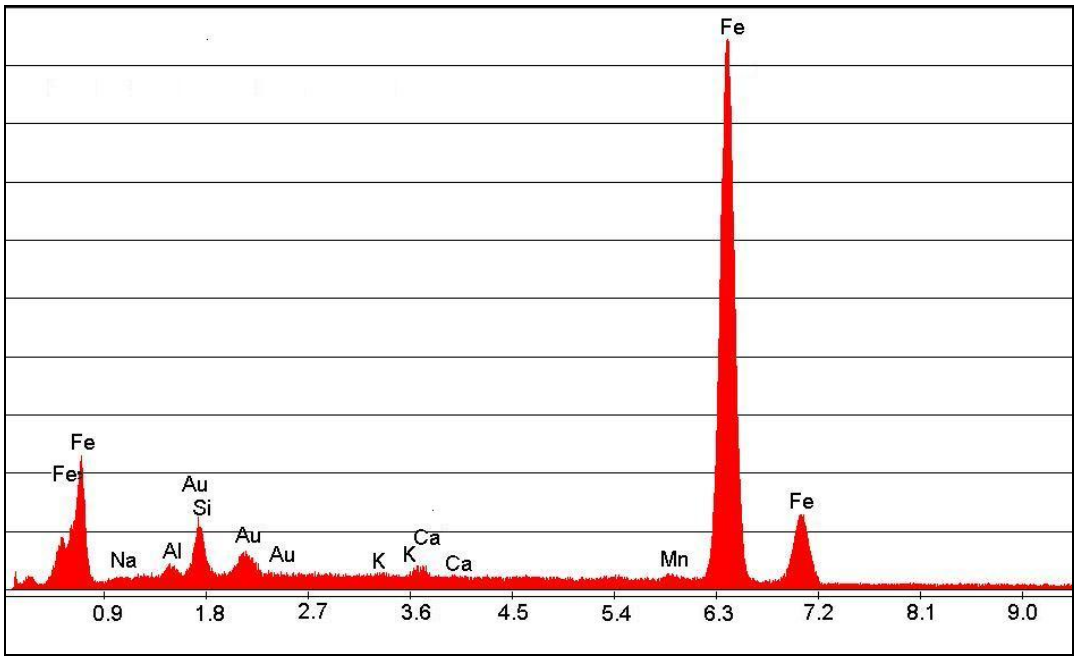


Figura 46- Espectro de EDS do concentrado ferroso obtido na separação magnética.

A análise do espectro comprova a presença predominante do Fe metálico no concentrado ferroso, uma vez que o principal componente do concentrado ferroso obtido na separação magnética do resíduo de granito é o Fe procedente da granalha de aço.

Pode-se notar também a existência de picos de baixa intensidade de manganês, alumínio, cálcio, potássio e silício o que comprova a eficiência da separação magnética.

5.3.2 Difração de raios-X

A Figura 47 apresenta o difratograma do concentrado ferroso obtido na separação magnética.

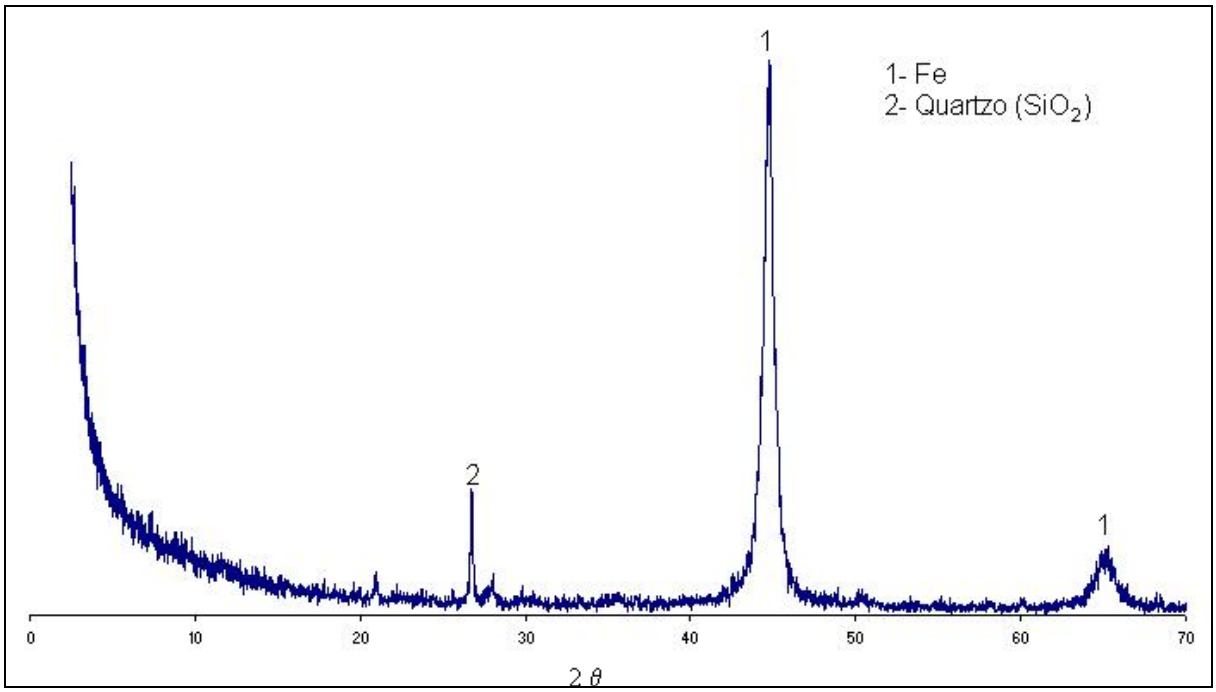


Figura 47- Difratograma do concentrado ferroso magnético.

Pelo difratograma apresentado na Figura 47, pode-se observar a presença de picos de Fe e um pico de baixa intensidade de quartzo. O difratograma comprova que o principal constituinte do concentrado ferroso obtido é o Fe metálico e comprova também a principal impureza presente é o SiO_2 decorrente do quartzo.

5.3.3 Análise granulométrica

A Figura 48 apresenta a análise granulométrica do concentrado ferroso obtido na separação magnética.

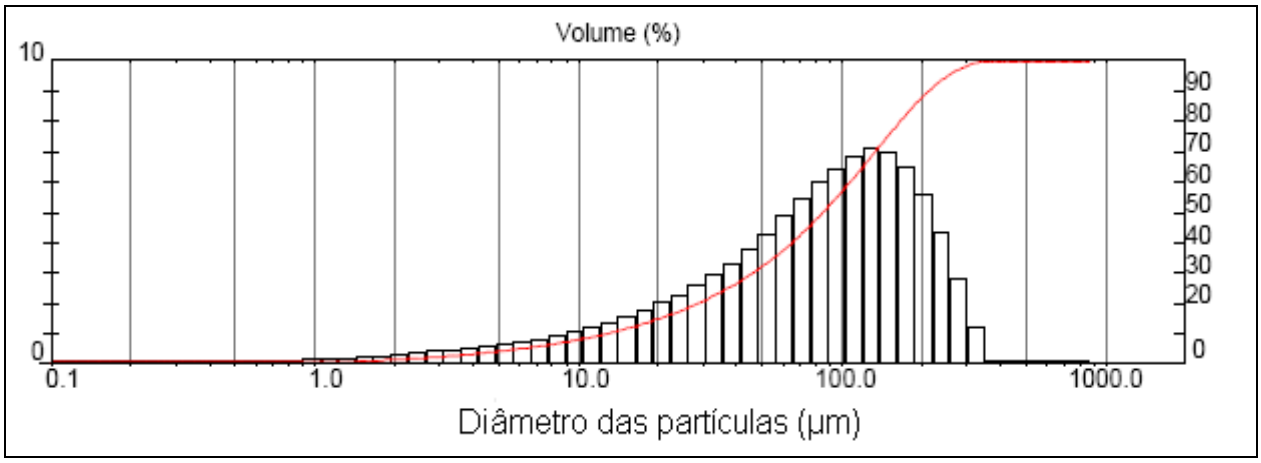


Figura 48- Distribuição granulométrica do concentrado ferroso obtido na separação magnética.

A granulometria do concentrado ferroso obtido na separação magnética está situada entre 0,36 a 477,0 µm. Assim, a granulometria apresentada está dentro da granulometria requerida para a confecção de briquetes.

Segundo Cunha et al[65], a granulometria para a produção de briquetes deve esta abaixo de 6,35 mm e, segundo Sampaio; Almeida e Silva [55], a granulometria para a confecção de briquetes deve estar abaixo de 3,3 mm, assim, a granulometria apresentada pelo concentrado ferroso atende aos dois casos.

5.4 CARACTERIZAÇÃO DO CONCENTRADO GRANÍTICO

Para a caracterização do concentrado granítico foi utilizado o produto obtido na separação magnética. Isso porque foi obtido o menor valor de Fe metálico, ficando em torno de 0,6%.

Pontes[24] estudou o comportamento do uso de resíduo de rochas ornamentais em cerâmicas vermelhas. Em seu trabalho, substituiu em partes a argila por resíduo contendo teores diferentes de Fe. Na sinterização feita a 900°C, o autor chegou à conclusão que o resíduo contendo menos Fe (0,7%) foi possível à obtenção de um maior valor de resistência de ruptura (10.738,2 kPa contra 7.671,7 kPa para o resíduo com 11,8% de Fe). Foi feita também a sinterização a 1.100°C, e neste caso

a resistência mecânica diminuiu com o aumento do teor de pó com 11,8% de Fe. Já a resistência mecânica aumentou com a utilização do pó contendo 0,7% de Fe.

Além de diminuir a resistência mecânica nas peças produzidas com pó contendo 11,8% de Fe, foram detectadas erupções do tipo coração negro, tornando inviável este aditivo (pó com 11,8% Fe) em cerâmicas vermelhas.

Gonçalves[70] fez um estudo para avaliar a influência da oxidação do Fe contido no resíduo de granito em concretos. Para verificar o potencial de oxidação do Fe, o autor[70] fez ensaios de imersão em uma solução com 3% de NaCl. Para pequenas adições de resíduo de corte de granito (20% em relação à massa de cimento), a oxidação do Fe não influenciou na resistência à tração na flexão.

Assim, como neste trabalho foi possível obter um material com apenas 0,6 % de Fe metálico, este pode ser usado em cerâmicas vermelhas e concretos.

A caracterização do concentrado granítico envolveu microscopia eletrônica de varredura, difração de raios-X e análise granulométrica. A Figura 49 apresenta uma amostra do concentrado granítico obtido na separação magnética.

Figura 49- Concentrado granítico obtido na separação magnética.

5.4.1 Difração de raios-X

Após a separação magnética, os principais minerais encontrados no resíduo foram o quartzo (SiO_2), albita ($Na(AlSi_3O_8)$), ortoclásio ($K(AlSi_3O_8)$) e muscovita ($(K,Na)(Al,Mg,Fe)_2(Si_{3,1}Al_{0,9})O_{10}(OH)_2$). A Figura 50 mostra o difratograma do concentrado granítico obtido na separação magnética do resíduo de granito.

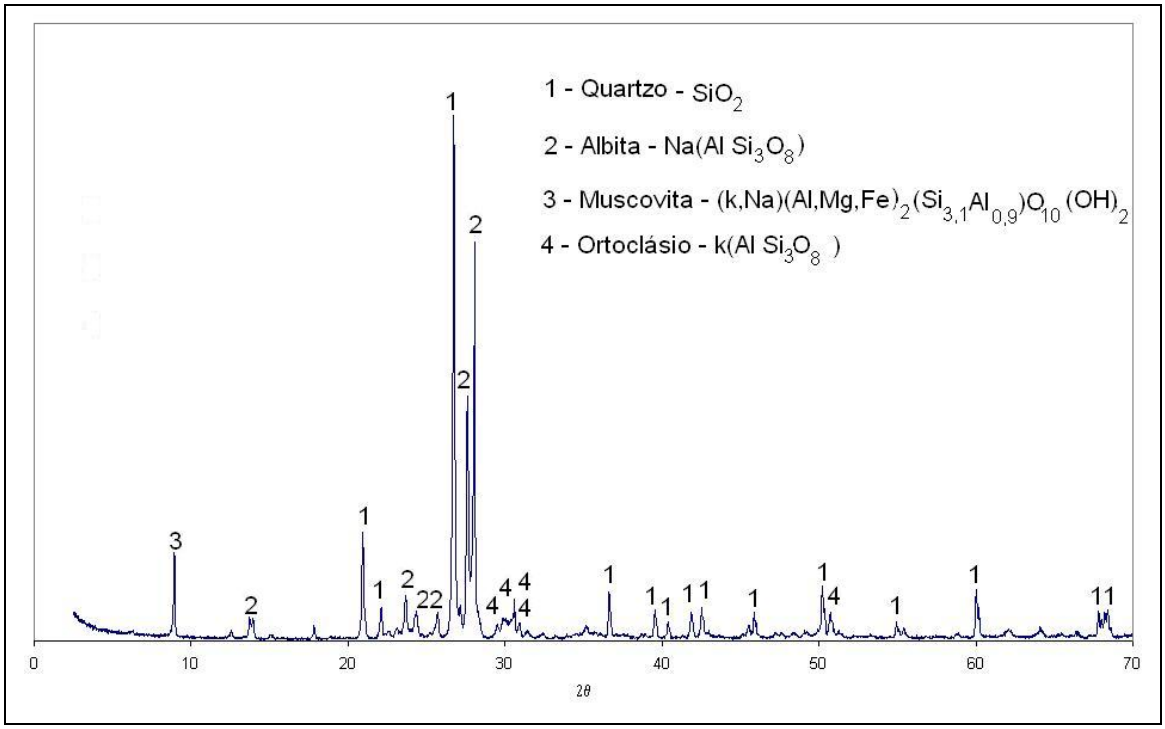


Figura 50- Difratograma do concentrado granítico.

Pode-se observar na Figura 50 que os picos revelados na difração do concentrado granítico obtido na separação magnética apresentam os mesmos constituintes apresentados no resíduo.

A predominância de picos de quartzo, albita, ortoclásio e muscovita já era esperada, uma vez que as micas são minerais fracamente magnéticos (sendo atraída por campos entre 10.000 a 18.000 Gauss) e os feldspatos são atraídos por campos magnéticos acima de 18.000 Gauss. Já o quartzo é um mineral diamagnéticos, ou seja, são repelidos quando sujeitos a um campo magnético [51,53].

5.4.2 Microscopia eletrônica de varredura

A Figura 51 apresenta uma imagem obtida através do microscópio eletrônico de varredura do concentrado granítico obtido na separação magnética. Em paralelo à obtenção da imagem, foi realizada a análise de EDS da região. A Figura 52 apresenta a análise de EDS realizada na amostra.

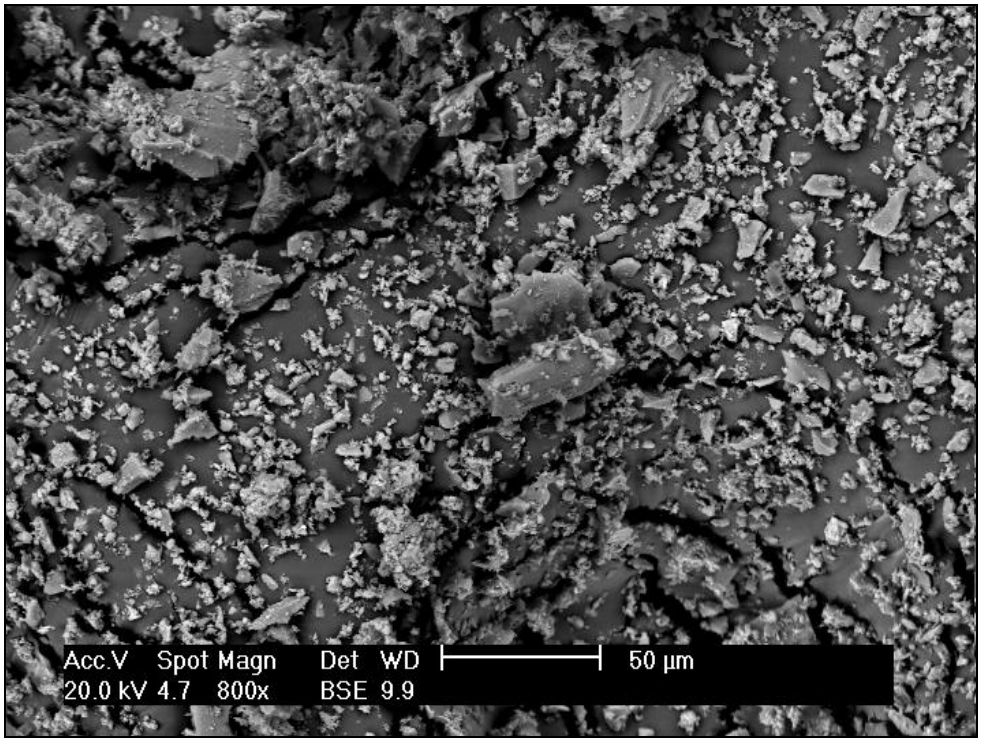


Figura 51- Imagem de elétrons retro-espalhados do concentrado granítico obtido na separação magnética.

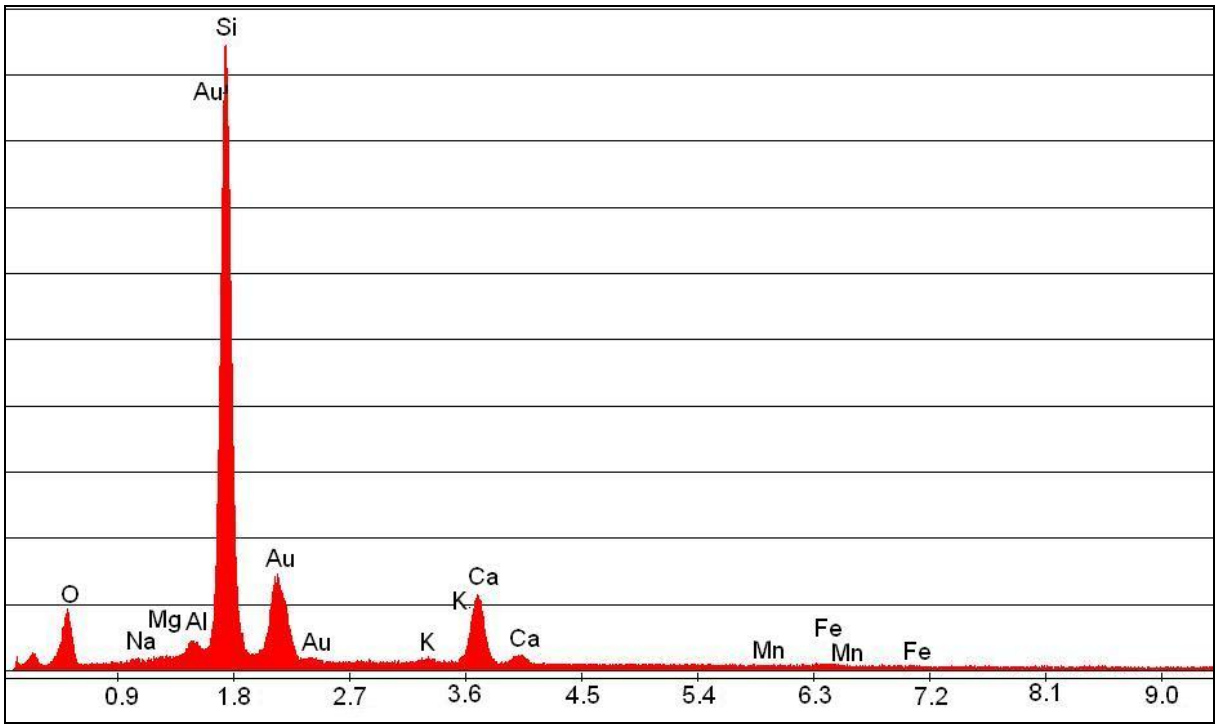


Figura 52- Espectro de EDS do concentrado granítico.

Pode-se observar a predominância de picos de silício e oxigênio. Estes picos são esperados devido ao principal constituinte do granito ser o SiO_2, e devido a este componente não ser magnético, assim, sendo predominante no concentrado granítico obtido na separação. Os picos de K, Al, Mg e Na são provavelmente decorrentes da albita, ortoclásio e muscovita.

5.4.3 Análise granulométrica

A Figura 53 apresenta a distribuição granulométrica do concentrado granítico obtido na separação magnética.

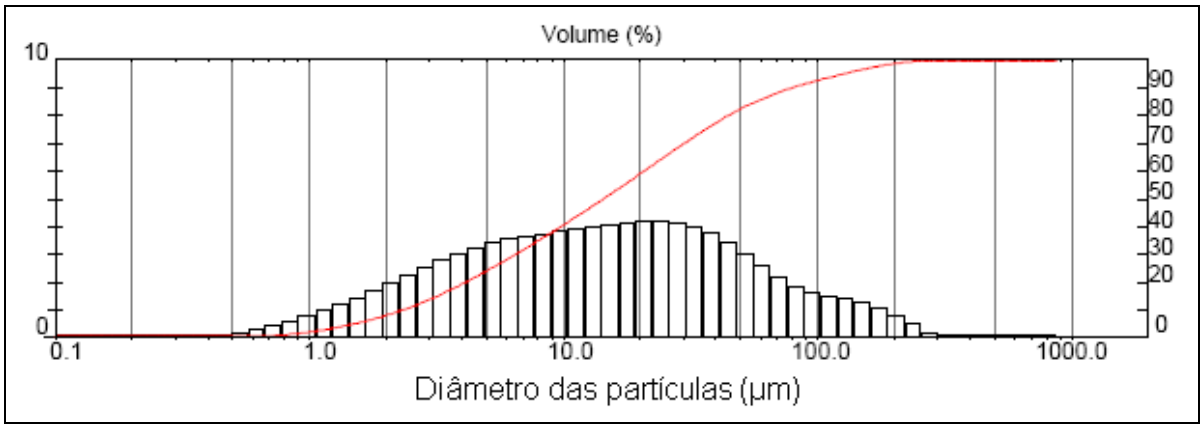


Figura 53- Distribuição granulométrica do concentrado granítico obtida na separação magnética.

A distribuição granulométrica é semelhante à distribuição granulométrica do resíduo, ficando entre 0,36 a 301,68 µm.

5.5 RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS BRIQUETES

A partir do Fe metálico obtido foram produzidos briquetes. Exemplos dos briquetes produzidos são apresentados na Figura 54.

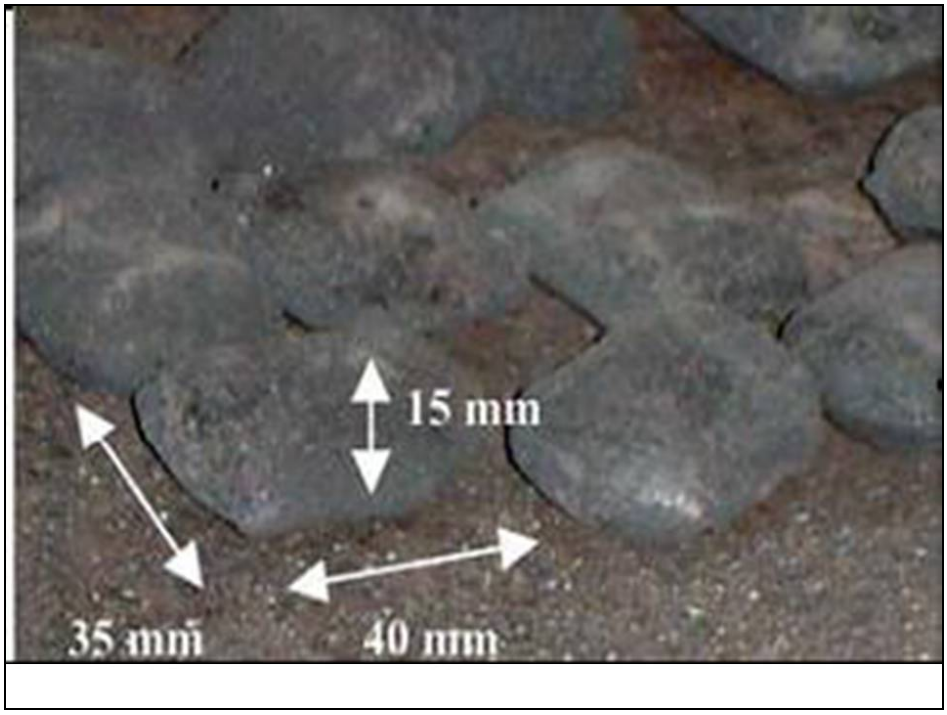


Figura 54- Briquetes produzidos a partir do concentrado ferroso.

Logo após a confecção, foram escolhidos aleatoriamente três briquetes para a determinação da resistência mecânica a verde em uma prensa mecânica dotada com uma célula de força. A resistência adquirida pelos briquetes a verde estão apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16- Resistência mecânica a verde dos briquetes produzidos.

Ensaio	Resistência mecânica (kN)
1	1,02
2	0,98
3	0,99

Cassola; Moraes e Tumolo Filho [64] produziram briquetes com finos de óxido de ferro utilizando diferentes tipos de aglomerantes. Quando utilizaram a cal hidratada como aglomerante, obteve uma resistência mecânica a verde de aproximadamente 1,18 kN. Os autores[64] também fizeram ensaios de resistência mecânica a verde com briquetes sem uso de aglomerantes, e nesse caso, foi obtido uma resistência de 0,98 kN.

No caso dos briquetes produzidos com Fe metálico obtido na separação magnética com uso de cal hidratada como aglomerantes, foi obtida uma resistência mecânica de no máximo 1,02 kN, um valor menor do que o encontrado por Cassola; Moraes e Tumolo Filho [64].

A menor resistência a verde obtida é decorrente da maior faixa granulométrica apresentada pelo material, pois segundo Liberati [71], a resistência mecânica a verde aumenta com a redução do tamanho das partículas.

Após a determinação da resistência mecânica a verde, outros três briquetes foram escolhidos aleatoriamente e foram secos em uma estufa a uma temperatura de 105°C por um período de 24 horas. Após a etapa de secagem, os briquetes foram rompidos na mesma prensa mecânica dotada com uma célula de força utilizada no ensaio de resistência mecânica a verde. Os valores de resistência mecânica a seco são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17- Resistência mecânica a seco dos briquetes.

Ensaio	Resistência mecânica (kN)
1	3,49
2	3,45
3	3,59

Pode-se observar que com a etapa de secagem, os briquetes tiveram uma melhora em sua resistência, de 1,02 kN para 3,59 kN.

Cassola; Moraes e Tumolo Filho [64], em seus ensaios utilizando 2% em massa de cal hidratada como aglomerantes e obtiveram uma resistência média dos briquetes a seco de 5,29 kN.

Um dos motivos da diferença apresentada pela resistência mecânica dos briquetes é com relação a granulometria, pois este fator influencia na quantidade de aglomerantes que devem ser utilizados. Quanto menor for a partícula, menor é a quantidade de aglomerantes necessária [60].

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos no presente trabalho pode-se concluir que:

1. O resíduo utilizado apresentou como principais constituintes o SiO_2 (65,9%), Al_2O_3 (13,4%) e Fe metálico (4,8%). As principais fases cristalinas encontradas foram o quartzo, albita, ortoclásio e a muscovita. Com relação a granulometria, o resíduo apresentou 82,6% abaixo de 0,044 mm.

2. A separação magnética mostrou-se eficiente na concentração do Fe metálico contido no resíduo de granito, uma vez que foi obtida uma massa de 94,4 g (4,5% da amostra inicial) apresentando um teor de Fe metálico de 93%. Já o concentrado granítico obtido representou 95,5% da massa inicial e apresentou um teor de Fe metálico de 0,6%.

3. Nos ensaios realizados na mesa concentradora foi obtido um concentrado ferroso com apenas 13,7% de Fe metálico. Neste concentrado, foi obtida uma massa total de 216,67 g (8,58% em relação à massa inicial). A ineficiência do uso da mesa concentradora se deve principalmente a fina granulometria apresentada pelo resíduo de granito.

4. A utilização de ciclone na recuperação de Fe metálico foi ineficiente, pois foi obtido um produto com no máximo 7,2% de Fe metálico.

5. Os briquetes produzidos a partir do concentrado ferroso obtido na separação magnética com utilização de 2% em massa de cal hidratada como aglomerante apresentaram resistência mecânica entre 3,45 a 3,59 kN.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 ABIROCHAS. Balanço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais em 2007. São Paulo, ABIROCHAS. 2008. Disponível em <http://www.ivolution.com.br/news/upload_pdf/5978/Retrospectiva_2007.pdf> acesso em 05/03/2008.

2 ABIROCHAS. Balanço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais em 2008. São Paulo, ABIROCHAS. 2008. Disponível em <http://www.ivolution.com.br/news/upload_pdf/6161/Balanco_2008.pdf> acesso em 07/09/2009.

3 ALMEIDA, S. L. M.; CHAVES, A. P. **Aproveitamento de rejeito de pedreiras de Santo Antônio de Pádua**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002. Disponível em <http://www.cetem.gov.br/publicacao/CETEM_SRMI_06.pdf> acesso em 09/07/2008. (serie Rochas e Minerais Industriais).

4 PEYNEAU, G. O. R.; PEREIRA, G. S. **Tratamento dos resíduos provenientes das serragens de granito através da implantação do filtro-prensa**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO,24., 2004, Florianópolis. Florianópolis: ENEGEP, 2004. Disponível em < http://www.uvv.br/cursos/publicacoes_EP/2004> acesso em 03/03/2008.

5 ALMEIDA, S. L. M.; PONTES, I. F. Aproveitamento de rejeitos de pedreiras e finos de serrarias de rochas ornamentais brasileiras. (em cd-rom). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ROCHAS ORNAMENTAIS, 1/ SEMINÁRIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 2. Salvador, 2001. **Anais**. Salvador: CETEM, 2001, p. 89-94.

6 FORMIGONI, G.E. BLEGGI, M.A.E.; SILVA, L.F.; EGERT, P.; SILVA, H.R.T. **Aproveitamento de resíduos: reciclagem de rochas naturais**. Unisul. Disponível em: < http://junic.unisul.br/2007/JUNIC/pdf/0120.pdf> acesso em 03/03/2008.

7 MOURA, W. A. ; Gonçalves, J. P. ; LEITE, R. da S.. Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento é confecções de lajotas para piso. **Sitientibus**, n. 26, p.49-61. Feira de Santana, 2002,. Disponível em: <http://www.uefs.br/sitientibus/pdf/26/utilizacaodoresiduodecortedemarmore.pdf> acesso em 03/03/2008.

8 MOTHÉ FILHO, H. F.; POLIVANOV, H.; C. MOTHÉ, G. Reciclagem dos Resíduos Sólidos de Rochas Ornamentais. **Anuário do Instituto de Geociências**, Janeiro, v.28, n.2, p.139-151, 2005.

9 SILVA, S. A. C.. **Caracterização do resíduo da serragem de blocos de granito:. Estudo do Potencial de Aplicação na Fabricação de Argamassas de Assentamento e de Tijolos de Solo-Cimento**. 1998. 159-179 p. Dissertação (Mestrado) - Núcleo de Desenvolvimento em Construção Civil – NDCC. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 1998.

10 PONTES, I. F.; VIDAL, F. W. H.. Valorização de resíduos de serrarias de mármore e granito e sua aplicação na construção civil. In: SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 5., 2005, Pernambuco. **Anais**. Rio de Janeiro: CETEM, 2005. p.117-125. Disponível em <http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2005-101-00.pdf> acesso em 03/03/2008.

11 SOUZA, J. N.; RODRIGUES, J. G.; NETO, P. N. de S.. **Utilização do Resíduo Proveniente da Serragem de Rochas Graníticas como Material de Enchimento em Concretos Asfálticos Usinados a Quente**. Disponível em: <http://www.sfiec.org.br/iel/bolsaderesiduos/Artigos/Artigo_Residuos_de_Serragem_de_rochas.pdf> acesso em 03/03/2008.

12 PONTES, I. F.; JÚNIOR, A. S.. Utilização De Resíduos De Rochas Ornamentais Nas Indústrias De Construção Civil. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 21., 2005, Natal. **Anais**. Rio de Janeiro: CETEM, 2005. v.2 Acesso em <http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2005-102-00.pdf> Acesso em 05/03/2008.

13 MENEZES, R. R.; ALMEIDA, R. R. de; SANTANA, L. N. L.; NEVES, G. A.; LIRA, H. L.; FERREIRA, H. C. Análise da co-utilização do resíduo do beneficiamento do caulim e serragem de granito para produção de blocos e telhas cerâmicos. **Revista Cerâmica**, v. 53, p. 192-199, 2007. Disponível em < http://www.scielo.br/pdf/ce/v53n326/14.pdf> acesso em 11/03/2009.

14 NUNES, R.L.S.; FERREIRA, H.S.; NEVES, G.A.; FERREIRA, H.C. Reciclagem de resíduos de granito para uso na indústria de revestimentos cerâmicos. (em cd-rom). In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA**, 46., 2002, São Paulo. Anais. São Paulo, Associação Brasileira de Cerâmica, 2002.

15 VIDAL, F.W.H. **A industria extrativa de rochas ornamentais no Ceará.** São Paulo, 1995. 178p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995. p. 12, 13.

16 CARUSO, L.G.; FARJALLAT, J.E.S.S.;TAIOLI, F. Os mármores e granitos brasileiros – seu uso e suas características tecnológicas. **Revista Rochas de Qualidade**, São Paulo, n.47, p. 67-74, 1978.

17 LISBÔA, E. M.. **Obtenção do concreto auto adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas**. 2004. 121 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004. p.55.

18 SPÍNOLA, V.; GUERREIRO, L. F.; BAZAN, R.. **A Indústria de Rochas Ornamentais**. Estudo de Mercado 02/04. Bahia, Desenbahia, 2004. Disponível em <http://www.desenbahia.ba.gov.br/recursos/news/video/%7B3FC152B1-BEAA-4ED5-B748-C370C1559F4B%7D_Rochas_ornamentarias.prn.pdf> acesso em 28/05/2008.

19 QUEIROZ, J. P. C. ; CARANASSIOS, A.. **Petrografia Microscópica e Caracterização de Rochas Ornamentais** .In: I JORNADA DO PROGRAMA DE CAPACITAÇÃO INTERNA, 1– CETEM. Disponível em < http://www.cetem.gov.br/publicacao/serie_anais_I_jpci_2008/Joedy_Patricia.pdf> acesso em 23/07/2008.

20 PEITER, C. C. *et al*.. **Rochas ornamentais no século XXI**: Bases para uma política de desenvolvimento sustentado das exportações brasileiras. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral; Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais, 2001.

21 SOSSAI, F. J. M.. **Caracterização tecnológica de rochas ornamentais**. 2006. 87p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006. p. 5.

22 STELLIN, M. R. M.. **Contribuição à escolha de mármores e granitos numa intervenção arquitetônica**. 2007. 101p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

23 PERONI, R.. **Rochas ígneas**. Rio Grande do Sul: UFRGS, 2003, 10p. Aula 6 para disciplina do Departamento de Engenharia de Minas, Geologia de Engenharia I. Disponível em <http://www.daf.on.br/mereane/geologia%20geral/seminario/6igneas_2003.pdf> acesso em 25/07/2008.

24 PONTES, I. F. **Aproveitamento de finos gerados nas serragens de mármore e granito**. 2000. 150p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. p. 6, 7, 45, 48, 49, 149, 137, 138, 139, 140, 141.

25 SLATER, A. C. **Rochas**. São Paulo: LEP LTDA, 1954. 185 p.

26 WILLIAMS, H.; TURNER, F.; GILBERT; C. M. **Petrografia: Uma introdução ao estudo das Rochas em Seções Delgadas**. São Paulo: Editora Polígono, 1970. p. 445.

27 VARGAS, T.; MOTOKI, A.; NEVES, J. L. P.. Rochas ornamentais do Brasil, seu modo de ocorrência geológica, variedade tipológica, explotação comercial e utilidades como Materiais nobres de construção. **Revista de Geociências**, Rio de Janeiro, p. 119-132. Disponível em: < http://www.geocities.com/rochasornamentais/2001/Itu2/Itu2.pdf> acesso em 24/09/2008.

28 MELO, R. M. de. Utilização do resíduo proveniente do acabamento e manufatura de granitos como matéria-prima em cerâmica vermelha. (em cd-rom). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17., 2006, Foz do Iguaçu. **Anais**. S.L.:S.M., 2006. p.2229-2240.

29 RIBEIRO, K. F. da S.; **Utilização do Resíduo de Granito em Massas Cerâmicas Empregadas na Obtenção de Revestimentos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 51., 2007, Salvador, 2007. Disponível em <http://www.abceram.org.br/51cbc/artigos/51cbc-14-12.pdf> Acesso em 06/03/2008.

30 NERY, M. A. C.; SILVA, E. A.. Balanço Mineral De Rochas Ornamentais – 1988 – 2000. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ROCHAS ORNAMENTAIS, 1/ SEMINÁRIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 2, Salvador, 2001. **Anais**. Salvador: CETEM, 2001. p.112-125.

31 REGADAS, I. C. M. da C.. **Aspectos Relacionados às lavras de granitos Ornamentais com Fio Diamantado no Norte do Estado do Espírito Santo, Brasil.** 2006. 130 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos 2006. p. 32.

32 RODRIGUES, G. F.. **Reciclagem de resíduos visando à produção de lã mineral**. 2009. 84 p. Dissertação (Mestrado) – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009. p. 52.

33 COCCHI, M.C.. Análise da incorporação de lama de manufatura do mármore em cerâmica estrutural. (em cd-rom). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS,17., Foz do Iguaçu, 2006. **Anais**. CBECIMat. S.L.:S.M., 2006. p.2022-2032.

34 BRISPARGO. **Produtos: Granito**. Disponível em: <http://www.brispargo.com/Brispedra.shtml>. Acessado em 08/01/2007.

35 COIMBRA FILHO, C. G.. **Relação entre processo de corte e qualidade de superfícies serradas de granitos ornamentais**. 2006. 168p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2006.

36 REIS, A. S.; ALVAREZ, C. E. de. A sustentabilidade e o resíduo gerado no beneficiamento das rochas ornamentais. In: ENCONTRO NACIONAL, 4, E ENCONTRO LATINO AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 2, Campo Grande, 2007. **Anais**. Campo Grande: 2007. p. 511-520.

37 ALMEIDA, S. L. M. de; PONTES, I. F.. Aproveitamento de Rejeitos de Pedreiras e Finos de Serrarias de Rochas Ornamentais Brasileiras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ROCHAS ORNAMENTAIS, 1 . SEMINÁRIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE 2, Salvador, 2001. **Anais**. Salvador: CETEM, 2001, p. 89 – 94.

38 JUNCA, E.. **Estudo da Utilização de Resíduo de Mármore como Desfosforante e Dessulfurante de Gusa Através de Termodinâmica Computacional**. 2007. 72 p, Monografia (Graduação) – Centro Federal de Educação Tecnologia do Espírito Santo, Vitória, 2007. p. 17.

39 MINAS GRANALHAS. **Granalhas para corte de Mármores e Granitos**. Disponível em: http://www.minasgranalhas.com.br/44.html. Acesso em: 15 de mar. 2008.

40 SAMPAIO, J. A.; WELLANKAMP, F.J. ; COSTA, I. L. S. da. **Mármores: mármores salviano**. Rio de Janeiro, CETEM, 2002.
Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2002-171-00.pdf> acesso em 06/03/2008.

41 RIBEIRO, R. P.. **Influência das características petrográficas de granitos no processo industrial de desdobramento de blocos**. 2005. 120p, tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2005. p. 10.

42 ALENCAR, C.R.A.; CARANASSIOS, A.; CARVALHO, D. **Tecnologias de Lavra e Beneficiamento de Rochas Ornamentais**. Fortaleza. Federação das Indústrias do Estado do Ceará - Instituto Euvaldo Lodi, 1995.

43 **TÉCNICA com fio (ou cabo) diamantado**. Disponível em:
< http://acd.ufrj.br/multimin/mmro/tcno/RO4-2-4-4.html> Acesso em: 19/04/2007.

44 CORTE COM FIO DIAMANTADO. **Revista Rochas de Qualidade**, São Paulo, n.192, jan/fev, p. 130, 2007.

45 RACHELE, K. G.; CORREIA, J. C. G.; RIBEIRO, R. C. da C.. Utilização de modelagem molecular como ferramentas para avaliação da interação entre resinas e rochas ornamentais no processo de resinagem. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTIFICA, 16., 2008, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: CETEM, 2008. p.85-91. Disponível em
<http://200.20.105.247/publicacao/serie_anais_XVI_jic_2008/Karen%20Goncalves%20Rachele.pdf> Acesso em 06/08/2009.

46 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

47 MOREIRA, J. M. S; FREIRE M. N; HOLANDA, J. N. F. Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha. **Revista Cerâmicas**, Goytacazes, n. 49, p. 262-267, 2003. Disponível em : < http://www.scielo.br/pdf/ce/v49n312/a1249312.pdf> Acesso em 30/07/2008.'

48 MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. de A.; FERREIRA, H. C.. Uso de rejeitos granitos como matérias-primas cerâmicas. **Revista Cerâmicas,** v.48, p.92-101, 2002. Disponível em < http://www.scielo.br/pdf/ce/v48n306/10685.pdf> Acesso em 25/08/2008.

49 GONÇALVES, J. P.; MOURA, W. A.; MOLIN, D. C. C. Avaliação da influência da utilização do resíduo de corte de granito (RCG), como adição, em propriedades mecânicas do concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 53-68, jan./mar. 2002.

50 VIEIRA, C.M.F.; SOARES, T.M.; MONTEIRO, S.N. Utilização de granito em massas cerâmicas para telhas**. Revista Cerâmica Industrial**, v. 9, n. 1, p.5, 2004.

51 SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B. da. Separação magnética e eletrostática. In: LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. da. **Tratamento de minérios**. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 2004. Cap. 8, p.305-335.

52 CALLISTER, W.D. **Materials science and engineering: an introduction.** 6. ed., New York, Wiley, 2003. John Wiley & Sons. U.S.A., 2003.

53 RIBEIRO, G. A. P.; As Propriedades Magnéticas da Matéria: Um Primeiro Contato. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 22, n. 3, p. 299 – 305, 2000. Disponível em < http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_299.pdf>. Acesso em 12/03/2009.

54 MIRANDA, J. M. A. Campo Magnético Crustal. In: **Introdução ao Geomagnetismo**. Cap. 3, p. 33 – 67. Disponível em: < http://www.cgul.ul.pt/documents/geomag_03.pdf > Acesso em 12/03/2009.

55 SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. de; SILVA, A. O. da. Ensaios em mesas oscilatórias. In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A.. **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 2007. Cap. 14, p.255-265.

56 Linz, F. A. F.. Concentração gravítica. In: LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. da. **Tratamento de minérios**. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 2004. Cap. 6, p.241-268.

57 BARROSO, R. C.; **Redução do teor de cinzas dos finos de carvão vegetal por concentração gravítica a seco**. 2007. 98p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

58 SAMPAIO, J. A.; OLIVEIRA, G. P.; SILVA, A. O. da. Ensaios de classificação em hidrociclone. In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A.. **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 2007. Cap. 7, p.139-154.

59 CHAVES, A. P.; **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. São Paulo: Signus editora, 1996, v.1.

60 CARVALHO, E. A. de; BRINCK, V.. Briquetagem. In: LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. da. **Tratamento de minérios**. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 2004. Cap. 15, p.613-636.

61 CUNHA, A. F. da; Caracterização, **Beneficiamento e Reciclagem de Carepas Geradas em Processos Siderúrgicos**.2006. 97 p. Dissertação (Mestrado) – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006. p. 49, 51.

62 SILVA, G. F. B. L.. **Reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos contendo ferro via tecnologia de aglomeração através da solução de um modelo multicriterial hierárquico e de programação línea**. 2004 . 211 p. Tese (Doutorado)–Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. p. 86, 87, 88.

63 SAMPAIO, J. A.; COSTA, L. S. N.; ANDRADE, M. C. de. Ensaios contínuos de briquetagem em bancada piloto. In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A.. **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 2007. Cap. 22, p.379-390.

64 CASSOLA, M. S..; MORAES, S. L. de; TUMOLO FILHO, M.. Aglomeração de finos de óxido de ferro – resíduo industrial. (em CD). In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REUSO/RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS, São Paulo, 2000. **Anais**. São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, 2000.

65 CUNHA, A. F. da; MOL, M. P. G.; MARTINS, M. E.; ASSIS, P. S.. Caracterização, beneficiamento e reciclagem de carepas geradas em processos siderúrgicos. **Revista Escola de Minas,** Ouro Preto, n.59, p. 111-116, 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rem/v59n1/a014.pdf>. Acesso em 08/06/2009.

66 FUJIMORI, S.. **Composição química de rochas e suas aplicações**. Salvador: Universidade Federal da Bahia, 1990. cap. 2, p. 51-96.

67 CARVALHO, M. R. da S.; RIBEIRO, R. C. da C.; CARRISSO, R. C. C.. Utilização do Rejeito do Corte de Granito em Pavimentação Asfáltica. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTIFICA, 16., 2008, Rio de Janeiro. **Anais**, Rio de Janeiro: CETEM, 2008. p.1-7. Disponível em <http://www.cetem.gov.br/publicacao/serie_anais_XIV_jiv_2006/Magno%20Carvalho.pdf> acesso em 06/08/2009.

68 BUZZI, D. C.. **Estudo de Classificação e Quantificação das Lamas Geradas no Processo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais**. 2008. 365 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008. p. 158, 159.

69 ESCÓCIO, V. A.; MARTINS, A. F.; VISCONTE, L. L.Y.; NUNES, R. C.R. Influência da Mica nas Propriedades Mecânicas e Dinâmico-Mecânicas de Composições de Borracha Natural. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 13, n 2, p. 130-134, 2003. Disponível em < http://www.scielo.br/pdf/po/v13n2/16582.pdf> Acesso em 06/08/2009.

70 GONÇALVES, J. P.. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. 2000. 120 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000. p. 56, 60, 61.

71 LIBERATI, J. F.. **Compactação isostática a quente do pó de aço rápido AISI M2**. 2001. 72.p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo, 2001. p. 13.