



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

Dissertação de Mestrado



“Processo de reciclagem da escória de aciaria e do resíduo de corte do granito visando a produção de lã mineral”



Autor: Joner Oliveira Alves

Orientadora: Profa. Dra. Denise Crocce R. Espinosa



Fevereiro de 2008



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

Joner Oliveira Alves

"Processo de reciclagem da escória de aciaria e do resíduo de corte do granito visando a produção de lã mineral"

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientadora: Profa. Dra. Denise Croce Romano Espinosa

Co-orientadores: Prof. Dr. Jorge Alberto Soares Tenório

Prof. Dr. Fernando Gabriel Silva Araújo

Ouro Preto, fevereiro de 2008

A474p

Alves, Joner Oliveira.

Processo de reciclagem da escória de aciaria e do resíduo de corte de granito visando a produção de lâ mineral [manuscrito] / Joner Oliveira Alves. – 2008.

xiii, 100 f. : il. color., graf., tabs.; mapas.

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Denise Crocce Romano Espinosa.

Co-orientador: Prof. Dr. Jorge Alberto Soares Tenório.

Co-orientador: Prof. Dr. Fernando Gabriel da Silva Araújo.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Rede Temática em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processos de fabricação.

1. Reciclagem - Indústria - Teses. 2. Resíduos - Teses. 3. Granito - Teses. 4. Lã de vidro - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto.
II. Título.

CDU: 628.477.6

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br





“Processo de Reciclagem da Escória de Aciaria e do Resíduo de Corte do Granito Visando a Produção de Lã Mineral”

Autor(a): Joner Oliveira Alves

Dissertação defendida e aprovada, em 07 de fevereiro de 2008, pela banca examinadora constituída pelos professores:


Profª Denise Crocce Romano Espinosa (DSc) – Orientadora
REDEMAT / Universidade de São Paulo


Prof. Jean Carlo Camasnie de Paola (DSc.)
UNICSUL-Universidade Cruzeiro do Sul


Prof. Jorge Alberto Soares Tenório (DSc.) Co-Orientador
REDEMAT / Universidade de São Paulo

**Aos meus pais,
João Alves Vieira e
Irene de Oliveira Vieira.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo que Ele representa;

à Profa. Dra. Denise Croce Romano Espinosa pela orientação neste trabalho e ensinamentos passados;

ao Prof. Dr. Jorge Alberto Soares Tenório pelo aprendizado passado, por sua grande ajuda e pela acolhida em seus laboratórios durante a minha estadia na USP;

ao meu pai João Alves Vieira, à minha mãe Irene de Oliveira Vieira e ao meu irmão Rander Oliveira Alves, por serem fonte de motivação e um ponto de paz com o qual sempre posso contar;

à Simone Kuster Mitre pelo amor, carinho e paciência neste período de muito trabalho e pouca atenção dedicada;

aos professores da REDEMAT, em especial aos mestres do Departamento de Física da UFOP, pelos ensinamentos passados;

ao Prof. Dr. Fernando Gabriel Silva Araújo por toda a sua colaboração para o andamento deste projeto;

aos doutores Jean Carlo Camasmie de Paola e José Roberto de Oliveira, pela troca de idéias e ajuda no trabalho;

aos grandes amigos da República Área 51 de Ouro Preto por todas as felizes histórias;

aos técnicos do Departamento de Metalurgia e Materiais da USP: Danilo, Lívio e Rubens pela grande ajuda na realização da parte experimental;

ao José Carlos, à Juliana e ao Vinícius pela ajuda com as análises químicas, difratométricas e microestruturais;

à Ana, por seu sempre cordial atendimento na REDEMAT;

aos colegas da pós-graduação da REDEMAT, em especial ao Joani, amigo desde a época da graduação em Física;

aos novos (as) amigos (as) do Laboratório de Análises Térmicas do Departamento de Metalurgia e Materiais da USP: Márcia, Viviane, Vivian, Rafael, Luís e Eduardo;

ao Departamento de Metalurgia e Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) pela disponibilidade dos laboratórios utilizados neste trabalho;

à Fundação Gorceix pela bolsa concedida e à FAPESP pelo apoio financeiro ao projeto.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS	XI
RESUMO.....	XII
ABSTRACT	XIII
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1. RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS	6
3.2. ESCÓRIA DE ACIARIA	12
3.2.1. GERAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA	13
3.2.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ESCÓRIA DE ACIARIA	16
3.2.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA ESCÓRIA DE ACIARIA.....	17
3.2.4. COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DA ESCÓRIA DE ACIARIA	18
3.2.5. FENÔMENO DA EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA.....	20
3.2.6. APLICAÇÕES DA ESCÓRIA DE ACIARIA	21
3.3. RESÍDUO DE GRANITO.....	23
3.3.1. O GRANITO	23
3.3.2. GERAÇÃO DO RESÍDUO DE GRANITO.....	26
3.3.3. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO RESÍDUO DE GRANITO.....	27
3.3.4. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO RESÍDUO DE GRANITO	28
3.3.5. COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DO RESÍDUO DE GRANITO.....	29
3.3.6. APLICAÇÕES DO RESÍDUO DE GRANITO.....	31
3.4. LÃ MINERAL	32
3.4.1. PRODUÇÃO DAS LÃS DE VIDRO E DE ROCHA	33
3.4.2. PROPRIEDADES E APLICAÇÕES DAS LÃS DE ROCHA E DE VIDRO	36
3.4.3. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS LÃS DE VIDRO E DE ROCHA	38
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
4.1. AQUISIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	40
4.2. ELABORAÇÃO DAS MISTURAS DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	41
4.2.1. COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS COM O RESÍDUO DE GRANITO COMO	
MATÉRIA-PRIMA PRINCIPAL	44
4.2.2. COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS COM A ESCÓRIA DE ACIARIA COMO	
MATÉRIA-PRIMA PRINCIPAL	44
4.2.3. COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS COM O RESÍDUO DE GRANITO E A	
ESCÓRIA DE ACIARIA COMO MATÉRIAS-PRIMAS PRINCIPAIS.....	45
4.3. A FUSÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	45
4.3.1. O FORNO DETROIT	46
4.3.2. ENSAIOS DE FUSÃO DOS MATERIAIS	47
4.4. O RESFRIAMENTO RÁPIDO.....	48
4.5. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS FORMADOS.....	50
4.5.1. ANÁLISE QUÍMICA	50
4.5.2. ANÁLISE DIFRATOMÉTRICA.....	51
4.5.3. ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	53

4.6. CÁLCULOS DOS DADOS TERMODINÂMICOS.....	54
4.7. ENSAIOS DE VISCOSIDADE HERTY	55
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
5.1. ANÁLISES QUÍMICAS DO RESÍDUO DO CORTE DE GRANITO E DA ESCÓRIA DE ACIARIA.....	57
5.2. CÁLCULOS TERMODINÂMICOS TEÓRICOS	59
5.3. ASPECTOS FÍSICOS DOS MATERIAIS FORMADOS	64
5.4. ANÁLISES QUÍMICAS DOS MATERIAIS FORMADOS.....	66
5.5. DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DOS MATERIAIS FORMADOS.....	69
5.6. ANÁLISES MICROESTRUTURAIS DOS MATERIAIS FORMADOS	82
5.7. VISCOSIDADE HERTY (FLUIDEZ).....	87
6. CONCLUSÕES	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Aplicações das escórias de aciaria e de alto-forno, no Brasil e no mundo (adaptado de YUAN, 2006).	3
Figura 1.2 - Características da Lã Mineral (ABRALISO, 2007).....	4
Figura 3.1 - Aproveitamento de resíduo na concepção de um novo produto (PEREIRA, 2006).	11
Figura 3.2 - Local utilizado como depósito de escória de aciaria (SILVA e LEITE, 2006).	12
Figura 3.3 - Foto do despejo da escória em um local utilizado como depósito (ALMEIDA e SILVA FILHO, 2007).....	14
Figura 3.4 - Evolução da produção mundial de aço bruto, em milhões de toneladas (CVRD, 2007).	15
Figura 3.5 - Produção, em milhões de toneladas, de aço em 2006 (CVRD, 2007). .	15
Figura 3.6 - Microfotografias de amostras de escória de aciaria: (A) ferrita de cálcio hidratada nos pontos 1, 2 e 3; (B) silicato dicálcico nos pontos 1 e 3, e silicato tricálcico no ponto 2 (POLESE et al., 2006).	19
Figura 3.7 - Erupções em uma estrada causada pelo fenômeno da expansibilidade da escória de aciaria (VILELA, 2006).	20
Figura 3.8 - Fotos de pedras de granito: (A) galego e (B) azul (BRISPARGO, 2007).	23
Figura 3.9 - Processo de extração do granito: (A) processo de corte em uma reserva de granito e (B) blocos de granitos extraídos das pedreiras (SANTOS, 2005)...	24
Figura 3.10 - Distribuição das reservas brasileiras de granito (DNPM, 2001).	25
Figura 3.11 - Prejuízos causados pelo mau uso do resíduo de granito: (A) danos à paisagem e (B) assoreamento das margens dos rios (MOTHÉ FILHO et al., 2005).	26
Figura 3.12 - Diagrama de equilíbrio de fases, ao ar, do sistema $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_3\text{O}_4$, mostrando a localização da argila e do rejeito (adaptado de SILVA, 2005).	30
Figura 3.13 - Diagrama de equilíbrio de fases do sistema $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$, mostrando a localização da argila e do rejeito (adaptado de SILVA, 2005).	30
Figura 3.14 - Utilização do resíduo de granito em mistura asfáltica (SOUZA et al., 2003).	31
Figura 3.15 - Amostras de vidro e vitrocerâmica, polida e sem polimento, produzidas a partir da escória de aciaria (FERREIRA et al., 2002-a).	33
Figura 3.16 - Representação da técnica Melt Spinning (adaptado de AFMA, 2007; TRDIC et al., 1999).....	34
Figura 3.17 - Produtos comercializados atualmente: (A) manta de lã de vidro, (B) flocos de lã de rocha, (C) mantas de lã de rocha e (D) painéis rígidos de lã de vidro (ISOVER, 2005; ROCKFIBRAS, 2007).....	35
Figura 3.18 - Utilização de lã mineral para isolamento termo-acústico: (A) no interior da parede e (B) exposta como parte do teto (TERMOLAN, 2005).	37
Figura 4.1 - Fluxograma que resume as atividades realizadas.	39
Figura 4.2 - Escória de aciaria utilizada no trabalho.....	40
Figura 4.3 - Resíduo do corte de granito utilizado no trabalho.....	40
Figura 4.4 - Funções relativas dos óxidos nos materiais vítreos (AKERMAN, 2000).	42
Figura 4.5 - Combinações de matérias-primas realizadas.	43

Figura 4.6 - Etapas da partida do forno Detroit: (A) forno desligado, (B) partida do forno e (C) forno ligado.....	46
Figura 4.7 - Forno Detroit em funcionamento durante os ensaios de fusão: (A) visão frontal e (B) detalhe da saída do forno.	47
Figura 4.8 - Gráfico da variação do volume específico em função da temperatura (AKERMAN, 2000).	48
Figura 4.9 - Processo de resfriamento em água do material.....	49
Figura 4.10 - Difratômetro de raios-X utilizado (PMI, 2008).	51
Figura 4.11 - Difratogramas típicos de: (A) material policristalino e (B) líquido ou sólido amorfo (PADILHA, 2000).	52
Figura 4.12 - Desenho esquemático de um Viscosímetro Herty em escala de laboratório (KEENE, 1995).	55
Figura 4.13 - Vazamento do material fundido no Viscosímetro Herty.....	56
Figura 4.14 - Viscosímetro Herty após o resfriamento do material.....	56
Figura 5.1 - Curva de resfriamento da lã de rocha: variação da composição do material (em porcentagem de peso) em função da temperatura (em grau Celsius).....	59
Figura 5.2 - Curva de resfriamento da lã de vidro: variação da composição do material (em porcentagem de peso) em função da temperatura (em grau Celsius).....	60
Figura 5.3 - Curva de resfriamento da composição obtida com a mistura "A": variação da composição do material (em porcentagem de peso) em função da temperatura (em grau Celsius).	61
Figura 5.4 - Curva de resfriamento da composição obtida com a mistura "C": variação da composição do material (em porcentagem de peso) em função da temperatura (em grau Celsius).	61
Figura 5.5 - Curva de resfriamento da composição obtida com a mistura "E": variação da composição do material (em porcentagem de peso) em função da temperatura (em grau Celsius).	62
Figura 5.6 - Curva de resfriamento da composição obtida com a mistura "B": variação da composição do material (em porcentagem de peso) em função da temperatura (em grau Celsius).	63
Figura 5.7 - Amostra do material formado através da mistura da escória de aciaria com aditivos, visando a produção de lã de rocha.....	65
Figura 5.8 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura "A" (resíduo de granito visando a produção de lã de rocha), com vazamento do material fundido a 1400°C.	72
Figura 5.9 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura "A" (resíduo de granito visando a produção de lã de rocha), com vazamento do material fundido a 1450°C.	72
Figura 5.10 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura "A" (resíduo de granito visando a produção de lã de rocha), com vazamento do material fundido a 1500°C.	73
Figura 5.11 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura "B" (resíduo de granito visando a produção de lã de vidro), com vazamento do material fundido a 1400°C.	73
Figura 5.12 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura "B" (resíduo de granito visando a produção de lã de vidro), com vazamento do material fundido a 1450°C.	74

Figura 5.13 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura “B” (resíduo de granito visando a produção de lâ de vidro), com vazamento do material fundido a 1500°C.	74
Figura 5.14 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura “C” (escória de aciaria visando a produção de lâ de rocha), com vazamento do material fundido a 1400°C.	75
Figura 5.15 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura “C” (escória de aciaria visando a produção de lâ de rocha), com vazamento do material fundido a 1450°C.	76
Figura 5.16 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura “C” (escória de aciaria visando a produção de lâ de rocha), com vazamento do material fundido a 1500°C.	76
Figura 5.17 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura “D” (escória de aciaria visando a produção de lâ de vidro), com vazamento do material fundido a 1400°C.	77
Figura 5.18 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura “D” (escória de aciaria visando a produção de lâ de vidro), com vazamento do material fundido a 1450°C.	77
Figura 5.19 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura “D” (escória de aciaria visando a produção de lâ de vidro), com vazamento do material fundido a 1500°C.	78
Figura 5.20 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura “E” (resíduo de granito + escória de aciaria visando a produção de lâ de rocha), com vazamento do material fundido a 1400°C.	79
Figura 5.21 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura “E” (resíduo de granito + escória de aciaria visando a produção de lâ de rocha), com vazamento do material fundido a 1450°C.	79
Figura 5.22 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura “E” (resíduo de granito + escória de aciaria visando a produção de lâ de rocha), com vazamento do material fundido a 1500°C.	80
Figura 5.23 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura “F” (resíduo de granito + escória de aciaria visando a produção de lâ de vidro), com vazamento do material fundido a 1400°C.	80
Figura 5.24 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura “F” (resíduo de granito + escória de aciaria visando a produção de lâ de vidro), com vazamento do material fundido a 1450°C.	81
Figura 5.25 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura “F” (resíduo de granito + escória de aciaria visando a produção de lâ de vidro), com vazamento do material fundido a 1500°C.	81
Figura 5.26 - Espectro de difração de raios-X de uma amostra de lâ de vidro comercializada atualmente.	82
Figura 5.27 - Mapeamento da composição química por EDS de uma fase secundária encontrada nos materiais produzidos através das misturas “A” e “B”.	83
Figura 5.28 - Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura do produto obtido através da mistura “A” (resíduo de granito visando a produção de lâ de rocha): (1) - fase secundária encontrada (espinélio).	84
Figura 5.29 - Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura do produto obtido através da mistura “B” (resíduo de granito visando a produção de lâ de vidro) : (1) - fase secundária encontrada (espinélio).	84

Figura 5.30 - Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura do produto obtido através da mistura “C” (escória de aciaria visando a produção de lã de rocha). 85

Figura 5.31 - Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura do produto obtido através da mistura “D” (escória de aciaria visando a produção de lã de vidro)..... 85

Figura 5.32 - Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura do produto obtido através da mistura “E” (resíduo de granito + escória de aciaria visando a produção de lã de rocha)..... 86

Figura 5.33 - Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura do produto obtido através da mistura “F” (resíduo de granito + escória de aciaria visando a produção de lã de vidro). 86

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 - Classificação dos resíduos sólidos segundo a norma NBR 10004 (adaptado de REVISTA SANEAMENTO AMBIENTAL, 1998).....	9
Tabela III.2 - Geração, tratamento e destinação final de resíduos sólidos industriais (KOMATSU, 2004).	10
Tabela III.3 - Análise química das escórias de aciaria LD e FEA (POLESE et al., 2006).	16
Tabela III.4 - Algumas propriedades da escória de aciaria (MANCIO, 2001).	17
Tabela III.5 - Comparação entre agregados de escórias de aciaria e de brita de granito (MANCIO, 2001).	18
Tabela III.6 - Pontos de fusão das fases presentes na escória de aciaria (MACHADO, 2000).	19
Tabela III.7 - Composição química dos resíduos gerados na produção de granito (FERREIRA et al., 2002).	27
Tabela III.8 - Composição química de resíduos gerados na produção de granito (CARVALHO et al., 2006).	27
Tabela III.9 - Distribuição granulométrica por peneiramento e sedimentação dos resíduos (FERREIRA et al., 2002).	28
Tabela III.10 - Temperatura máxima de utilização de alguns materiais isolantes (LABRINCHA, 2006).	37
Tabela III.11 - Composição química, em % de peso, da lã de vidro segundo diferentes autores (BRAGA 1991; BUCK, 1997; LUOTO et al., 1998).	38
Tabela III.12 - Composição química, em % de peso, da lã de rocha segundo diferentes autores (BRAGA 1991; JURY, 1997; LUOTO et al., 1998).	38
Tabela IV.1 - Quantidade dos elementos adicionados para as misturas com o resíduo de granito como matéria-prima principal.	44
Tabela IV.2 - Quantidade dos elementos adicionados para as misturas com a escória de aciaria como matéria-prima principal.	44
Tabela IV.3 - Quantidade dos elementos adicionados para as misturas com o resíduo de granito e a escória de aciaria como matérias-primas principais.	45
Tabela V.1 - Composição química do resíduo do corte de granito, em porcentagem de peso.	57
Tabela V.2 - Composição química da escória de aciaria elétrica, em porcentagem de peso.	58
Tabela V.3 - Composição química dos produtos formados a partir do resíduo de granito visando a produção de lã de rocha (mistura "A") e lã de vidro (mistura "B").	67
Tabela V.4 - Composição química dos produtos formados a partir da escória de aciaria visando a produção de lã de rocha (mistura "C") e lã de vidro (mistura "D").	68
Tabela V.5 - Composição química dos produtos formados a partir do resíduo de granito e da escória de aciaria visando a produção de lã de rocha (mistura "E") e lã de vidro (mistura "F").	69
Tabela V.6 - Resultados dos ensaios de Viscosidade Herty (Fluidez) registrados... ..	88

RESUMO

O trabalho teve como objetivo o estudo do reaproveitamento da escória de aciaria e do resíduo de corte do granito visando a produção de lã de vidro e de lã de rocha. Inicialmente foi analisada a composição química da escória de aciaria e do resíduo de corte do granito. Com os valores encontrados procedeu-se uma verificação dos ajustes necessários nas composições da escória e do resíduo visando uma aproximação das composições das lãs de vidro e de rocha constantes na literatura. Posteriormente, foi utilizado um forno a arco elétrico, em escala de laboratório, para fundir amostras com diferentes misturas dos resíduos citados. Primeiramente, foi realizada uma mistura com o resíduo de granito como matéria-prima principal, em seguida utilizou-se a escória de aciaria como matéria-prima, e por fim, procedeu-se a mistura dos dois resíduos. Com a fusão das misturas, o produto foi vazado nas temperaturas de 1400°C, 1450°C e 1500°C, primeiro sobre um recipiente com água, visando um resfriamento brusco e com isso uma aproximação do método de produção das lãs citadas. No segundo vazamento foi feito o ensaio de viscosidade Herty. Amostras dos materiais produzidos foram caracterizadas por técnicas de análises químicas, difratométricas e microestruturais, sendo que, os resultados obtidos foram comparados aos valores encontrados na literatura. Os resultados encontrados neste trabalho podem dar início a uma inovação tecnológica, pois permitem o reaproveitamento da escória de aciaria e do resíduo de granito, transformando-os em subprodutos e, além disto, encontrou-se uma alternativa econômica para a produção de lã mineral, que possui amplo mercado como isolante térmico, acústico e inibidor de propagação de chamas.

ABSTRACT

The aim of this work was to study the use of steelmaking slag and waste from granite cutting as raw material to the production of glass wool and rock wool. Firstly, the chemical composition of the slag and the granite waste were analyzed. These results were used to infer the amount of additives to assemble the charge for the experiments. Two charges compositions were aimed: the composition of glass wool and rock wool found in the literature. Thus, six mixtures were prepared: two using steelmaking slag as main raw-material, two using granite cutting waste as main raw-material and two mixtures of both residues as main raw material. A laboratory-scale electric furnace was used to melt the studied mixtures of residues and additives used as charge. Three different temperatures were studied: 1400°C, 1450°C and 1500°C. Firstly, a small amount of the melt material were turned into a water filled recipient, this process was performed in order to impose a fast freezing that is a characteristic of mineral wool production. Finally, with the rest of the melt material it was performed the Herty Viscosity Test. Samples of the produced material were characterized by chemical analysis, X-ray diffraction and Scanning Electronic Microscopy. The results found in this research may lead to a technological innovation, because they indicate that the use of residues to produce glass and rock wool is possible.

1. INTRODUÇÃO

Uma das principais preocupações do mundo moderno é com relação à preservação do meio ambiente. A realização do presente trabalho visou a obtenção das bases do conhecimento para a transformação de dois resíduos industriais em matérias-primas, através da re-inserção destes no meio produtivo, e assim, diminuindo o impacto causado pela exposição destes ao ambiente. Além disto, o novo produto formado possui amplo mercado, e a utilização do material reciclado implica em uma diminuição da extração de recursos naturais necessários para a geração deste.

O aproveitamento, total ou parcial, de rejeitos constitui vantagens que coloca o fabricante em uma posição fortemente competitiva no mercado, devido não apenas à questão econômica, como também à oportunidade de veiculação deste princípio como marketing ecológico (SILVA, 2006).

A reciclagem de resíduos sólidos (tema discutido na primeira parte da Revisão Bibliográfica) é uma crescente nos dias atuais, visto que a produção industrial se expande a cada ano. O aumento da produção industrial traz consigo um grave problema, a disposição do lixo produzido. A transformação do lixo industrial em subprodutos pode ser economicamente viável, uma vez que o descarte ou a disposição deste acarreta gastos tanto com o seu transporte, quanto com o controle das áreas de depósito, além da pressão social associada a este tema (FERREIRA et al., 2002).

Neste projeto, os resíduos industriais a serem aproveitados são a escória de aciaria e o resíduo do corte de granito, e o novo produto a ser gerado é a lã mineral, mais especificamente a lã de vidro e a lã de rocha.

A segunda parte da Revisão Bibliográfica traz uma discussão sobre a escória de aciaria, um resíduo da fabricação do aço, resultante da agregação de diversos elementos que não interessam estar presente no material aço.

O setor siderúrgico se encontra em franca expansão e com ele a produção de escória de aciaria, sendo que, a geração mundial deste resíduo é estimada em 44 milhões de toneladas por ano e a brasileira em 3 milhões de toneladas por ano (IBS, 2007). O grande volume deste material faz com que a procura por meios de seu reaproveitamento seja grande, porém algumas de suas propriedades fazem com que seu uso seja restrito.

A escória de alto-forno, outro resíduo da indústria siderúrgica, possui várias aplicações como subproduto (YUAN, 2006). Entretanto, diferentemente da escória de alto-forno, a utilização da escória de aciaria na fabricação de certos produtos, como a lã mineral, ainda é um obstáculo a ser superado. Tal fato se deve a alta relação CaO/SiO_2 presente na composição da escória de aciaria, fazendo com que haja CaO livre. Esta fase apresenta expansão com longos tempos para a sua estabilização, e além disto, o CaO livre diminui a vitrificação da escória (OLIVEIRA, 2000).

Devido as dificuldades mencionadas, os projetos de aplicação da escória de aciaria, se desenvolveram no sentido de usar este resíduo em materiais de construção, como por exemplo, concreto, argamassa e base asfáltica. Porém, estudos mostraram que esta utilização tem restrições no que se refere a capacidade de hidratação da escória de aciaria após sua utilização, fazendo com que os materiais fabricados tenham sua integridade física comprometida (MACHADO, 2000; BRANCO, 2004).

Uma comparação entre as aplicações das escórias de aciaria e de alto-forno pode ser feita observando-se a Figura 1.1. Através da análise desta figura pode-se perceber que a utilização da escória de alto-forno, no mundo, para a fabricação de lã mineral equivale a apenas 1,4% do total, sendo que no Brasil esta técnica não é adotada. Por sua vez, a utilização da escória de aciaria para este mesmo fim não possui números significativos no Brasil e no Mundo. Portanto, esta é uma técnica nova e que pode se tornar bastante útil, uma vez que, a lã mineral possui um grande mercado consumidor.

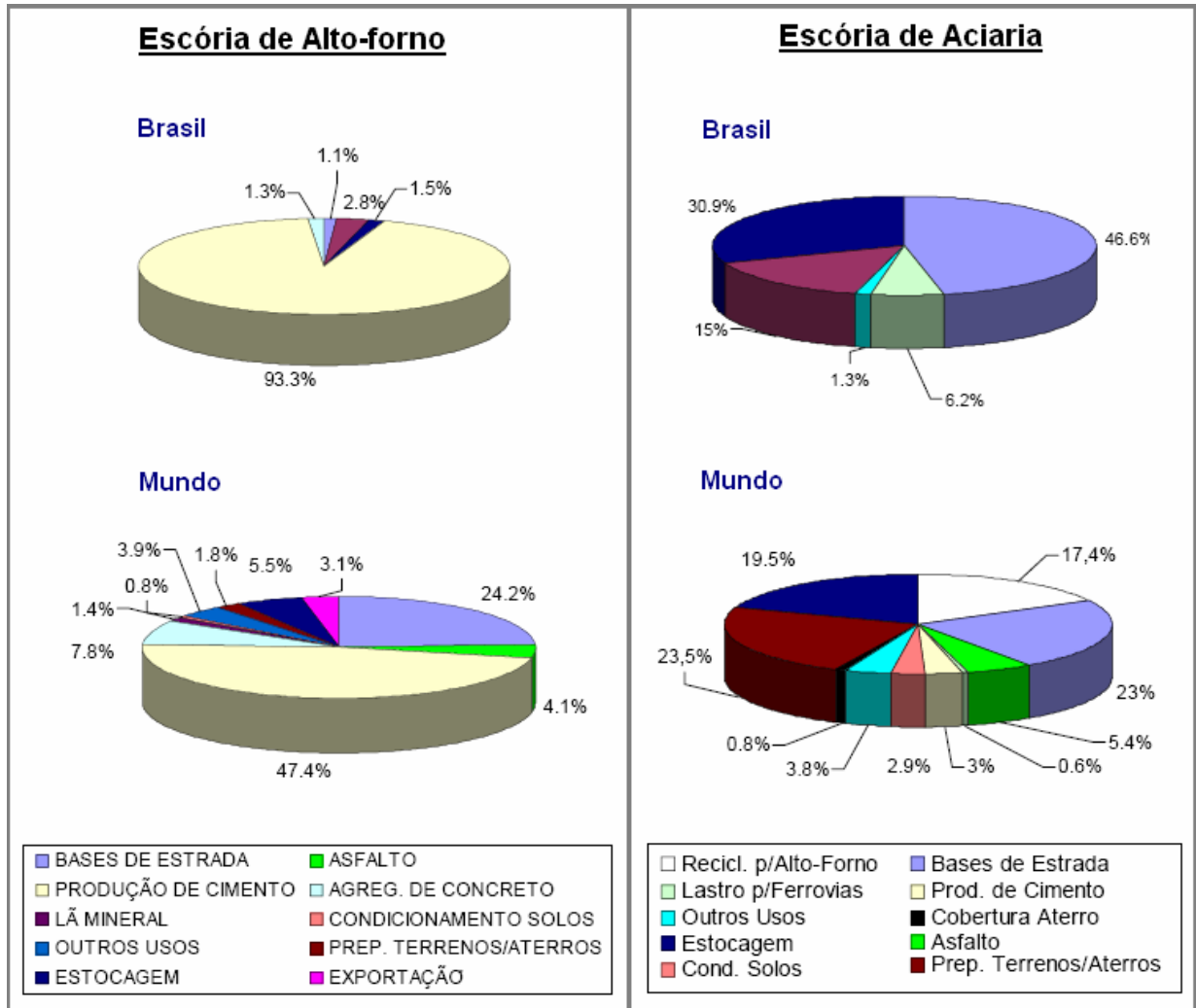


Figura 1.1 - Aplicações das escórias de aciaria e de alto-forno, no Brasil e no mundo (adaptado de YUAN, 2006).

Outro setor industrial com grande produção de resíduo é o da indústria de corte do granito (tema discutido na terceira parte da Revisão Bibliográfica). Este rejeito deve ser tratado com cuidado, pois quando em contato com rios, lagoas ou reservatórios de água ele pode causar assoreamento, além de apresentar riscos à saúde humana, podendo causar graves problemas, como a silicose (MOREIRA et al., 2004; RIBEIRO et al., 2004).

O resíduo de granito possui alto teor de sílica, portanto uma nova rota para o seu aproveitamento pode ser a sua utilização como subproduto para a produção de lã de vidro ou lã de rocha, materiais que necessitam de uma alta quantidade de sílica em suas composições.

Na quarta parte da Revisão Bibliográfica encontra-se um estudo sobre a lã mineral, um material composto por fibras inorgânicas produzidas industrialmente na forma de lã de vidro, rocha, carbono ou cerâmica, sendo que as duas lãs citadas inicialmente receberam uma abordagem especial, uma vez que estas foram os produtos estudados neste trabalho. A lã mineral possui excelentes propriedades (como ilustrado pela Figura 1.2), o que faz com ela seja amplamente empregada para isolamento termo-acústico e em diversos produtos manufaturados (ROCKFIBRAS, 2007).



Figura 1.2 - Características da Lã Mineral (ABRALISO, 2007).

Por fim, esta dissertação trás ainda a metodologia e os materiais utilizados durante a realização do trabalho, bem como os resultados e as conclusões obtidas.

2. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são:

- ⇒ estudar a viabilidade técnica do uso da escória de aciaria como matéria-prima no processo de fabricação de lã de vidro e lã de rocha;
- ⇒ investigar a aplicabilidade dos produtos formados a partir da reciclagem do resíduo de corte de granito na produção de lãs de vidro e de rocha;
- ⇒ buscar uma associação entre o resíduo do corte de granito e a escória de aciaria visando, através desta mistura, a fabricação das lãs de vidro e de rocha.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS

O marcante crescimento das indústrias nas últimas décadas fez crescer a preocupação com o meio ambiente, uma vez que o aumento da produtividade traz consigo o crescimento da produção do lixo industrial. As empresas siderúrgicas, em especial, enfrentam dificuldades para manejar a grande quantidade de resíduos gerados pelo processo de fabricação do aço (FERREIRA et al., 2002).

Pesquisas vêm sendo desenvolvidas no intuito de encontrar aplicações para os rejeitos industriais ao invés de simplesmente descartá-los, pois o descarte destes resíduos acarreta gasto energético para o transporte do material e dificuldade para o controle das áreas para depósito, além de sofrer crescente pressão social para sua diminuição (FERREIRA et al., 2002; DELLA et al., 2005).

O reaproveitamento dos materiais pela reciclagem prolonga o ciclo de vida dos materiais e com isso diminui o consumo de recursos naturais não renováveis, conservando o meio ambiente e evitando a exaustão de certas reservas naturais (MEDINA, 2006).

No passado, a indústria em geral encarava os resíduos sólidos como sobras dos processos que deveriam ser simplesmente descartados, sem maiores preocupações quanto a sua destinação. Alguns fatores fizeram com que esta visão fosse alterada, dentre os principais vetores da mudança podemos destacar:

- ⇒ a percepção de que o meio ambiente não teria uma capacidade inesgotável de absorver as “contribuições” do setor industrial na forma de rejeitos;
- ⇒ a busca incessante pela competitividade, exigindo das empresas uma análise crítica de seus processos, no sentido do aumento de eficiência e maximização da utilização de recursos, na forma de matérias-primas ou de energia;
- ⇒ as mudanças na legislação ambiental;
- ⇒ as exigências do mercado externo acerca do comprometimento com as questões ambientais, como a criação da ISO 14.001, do Selo Verde, etc (OLIVEIRA, 2006).

Segundo a Norma ABNT NBR 10.004, “resíduos são definidos como materiais decorrentes de atividades antrópicas, gerados como sobras de processos ou aqueles que não possam ser utilizados com a finalidade para as quais foram originalmente produzidos” (ABNT, 2004).

Os resíduos sólidos originam-se das atividades de diversos ramos da indústria (metalúrgica, química, petroquímica, papelreira, entre outras) e podem apresentar-se de forma bastante variada: cinzas, lodos, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, plásticos, papéis, madeiras, fibras, borrachas, metais, escórias, vidros ou cerâmicas (ALMEIDA E VILHENA, 2000).

Evidenciou-se nos últimos anos que uma conservação dos recursos minerais, energéticos e ambientais é imprescindível. Realizar um equilíbrio entre o consumo e a não degradação destes recursos é possível, para tanto a reciclagem é um fator fundamental. O aproveitamento de resíduos dos processos industriais exerce um importante papel na economia de jazidas escassas de matéria-prima bruta, na diminuição da poluição indiscriminada e no racionamento de energia, transformando uma fonte de despesas em uma fonte de faturamento ou, pelo menos, de redução das despesas de eliminação (DELLA et al., 2005).

O processo de reciclagem pode ser definido como um conjunto de técnicas cuja finalidade é aproveitar detritos e rejeitos, re-introduzindo estes no ciclo de produção (MENEZES et al., 2002). A tendência é que a reciclagem se converta numa prática habitual, de acordo com uma ou mais modalidades a seguir definidas:

- ⇒ reciclagem primária - o produto original é empregado no próprio local de produção;
- ⇒ reciclagem secundária - o material é re-introduzido no ciclo de utilização com uma finalidade diversa;
- ⇒ reciclagem terciária - o material original é decomposto e usado para obter outro material (NETO, 2004).

A adoção da reciclagem por parte de uma empresa ajuda a preservar os recursos naturais, reduz a destruição da paisagem e contribui para a melhoria da saúde e segurança da população em geral e de seus trabalhadores (MENEZES et al., 2002).

Nos últimos anos, a pesquisa sobre o reaproveitamento de resíduos industriais foi intensificada em todo o mundo. No grupo dos países desenvolvidos, a reciclagem é vista como um mercado altamente rentável. O elevado investimento em pesquisa gera aumento na qualidade do produto reciclado e leva a uma produção mais efetiva (MENEZES et al., 2002).

No Brasil, a reciclagem de resíduos ainda possui baixos índices frente ao montante produzido, embora estes números tenham aumentado nas últimas décadas devido à dedicação de pesquisadores ao estudo desse tema, obtendo-se resultados bastante relevantes (MENEZES et al., 2002). Comparativamente a países desenvolvidos, o reaproveitamento de resíduos nacional é ainda tímido, sendo que uma exceção deve ser feita à intensa reciclagem praticada nas indústrias de cimento e aço (ANGULO et al., 2001).

No geral, o atraso da reciclagem brasileira possui origem nos repetidos problemas econômicos e sociais que ocupam a agenda de discussões políticas. Mesmo a discussão mais sistemática sobre resíduos sólidos é recente. A questão ambiental no Brasil, ainda é tratada como sendo um problema de preservação da natureza, particularmente florestas e animais em extinção, deposição em aterros adequadamente controlados e controle da poluição do ar, com o estado exercendo o papel de polícia (ANGULO et al., 2001).

Ações conjuntas entre indústrias, governos, universidades, centros de pesquisa e população são consideradas fundamentais para uma melhor implementação de negócios na área de reaproveitamento de resíduos (MANCIO, 2001).

Segundo a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), órgão ligado a Secretaria de Estado do Meio Ambiente do Governo de São Paulo, durante a década de 90, somente no estado de São Paulo foram gerados anualmente mil toneladas de resíduos Classe I, classificados como perigosos, e 25 milhões de toneladas de resíduos Classe II, que são menos problemáticos em termos de potencial poluidor (REVISTA SANEAMENTO AMBIENTAL, 1998). A Tabela III.1 demonstra os critérios adotados para a classificação dos resíduos.

Tabela III.1 - Classificação dos resíduos sólidos segundo a norma NBR 10004
(adaptado de REVISTA SANEAMENTO AMBIENTAL, 1998).

Classificação	Propriedades	Características especificadas
Classe I (Perigoso)	Inflamabilidade	<ul style="list-style-type: none"> • ponto de Fulgor < 60° C se líquido; • produzir fogo por fricção, não sendo líquido; • oxidante liberando oxigênio.
	Reatividade	<ul style="list-style-type: none"> • instável reagindo violentamente com o ar; • reagir violentamente com a água; • formar misturas explosivas com a água; • gerar gases, vapores, fumo; • produzir reação expressiva ou detonante; • ser explosivo; • possuir íons CN⁻ ou S²⁻, em concentrações que liberem 250 mg de HCN/kg ou 500 mg de H₂S/kg de resíduo.
	Patogenicidade	<ul style="list-style-type: none"> • se possuir microorganismos patogênicos, vírus, toxinas, etc.
	Toxicidade	<ul style="list-style-type: none"> • DL50 oral para ratos < 50 mg/Kg; • CL50 inalação para ratos < 2 mg/L; • DL50 dérmica para coelhos < 200 mg/Kg; • extrato lixiviado conforme NBR-10005, apresenta contaminantes em concentrações superiores aos valores estabelecidos; • restos de embalagem com substâncias constantes na lista de substâncias tóxicas ou agudamente tóxicas; • resultar de derramamento de produtos ou fora de especificação que contenham substâncias tóxicas ou agudamente tóxicas.
	Corrosividade	<ul style="list-style-type: none"> • pH ≤ 2 e pH ≥ 12,5; • corroer aço a uma razão maior que 6,35 mm/ano;
Classe II - A	Não Inertes	<ul style="list-style-type: none"> • extrato solubilizado, conforme norma NBR-10006, apresenta concentrações superiores ao padrão estabelecido; • padrões de concentração superiores ao permitido quanto a potabilidade da água;
Classe II - B	Inertes	<ul style="list-style-type: none"> • extrato solubilizado com concentrações inferiores ao padrão estabelecido.

Segundo a norma regulamentadora NR 25 do Ministério do Trabalho e Emprego, que trata sobre a legislação vigente para os resíduos industriais, “os resíduos sólidos devem ser convenientemente tratados, dispostos ou retirados dos limites da indústria, evitando riscos à saúde e à segurança dos trabalhadores” (M.T.E., 2006).

A Tabela III.2 mostra o quadro de geração, tratamento e destinação final de resíduos sólidos industriais de um total de 1432 indústrias inventariadas.

Tabela III.2 - Geração, tratamento e destinação final de resíduos sólidos industriais (KOMATSU, 2004).

Resíduo	Tipo	Geração (t/ano)	Tratamento (t/ano)	Estocagem (t/ano)	Disposição no solo (t/ano)
Classe I	perigosos	535.615	286.930	164.520	84.165
Classe II-A	não inertes	25.038.167	8.816.065	571.314	15.650.788
Classe II-B	inertes	1.045.896	352.463	103.988	589.445
Total	----	26.619.678	9.455.458	839.822	16.324.398
%	----	100,00	35,52	3,15	61,32

Um processo de reaproveitamento de um resíduo sólido, para ser bem sucedido, precisa de etapas bem definidas, que podem ser divididas em (NETO, 2004):

- i. caracterização física e química do resíduo;
- ii. caracterização da microestrutura;
- iii. pesquisa das possíveis aplicações;
- iv. análise de viabilidade financeira;
- v. análise de impacto ambiental do novo produto;
- vi. análise de riscos à saúde;
- vii. análise de desempenho técnico;
- viii. desenvolvimento do processo de produção;
- ix. marketing.

A reciclagem do resíduo dentro do mesmo processo responsável por sua geração (reciclagem primária) apresenta limitações. O reaproveitamento de um resíduo em outro processo produtivo que não aquele que o originou (reciclagem secundária) apresenta inúmeras possibilidades (JOHN, 2006). Um esquema do processo de reciclagem secundária é demonstrado na Figura 3.1.

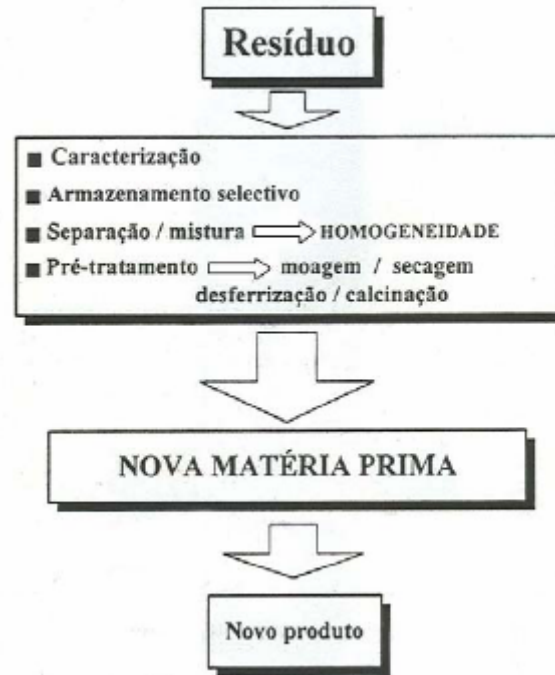


Figura 3.1 - Aproveitamento de resíduo na concepção de um novo produto (PEREIRA, 2006).

No Brasil, a maior experiência na área de reciclagem de produtos gerados por outras indústrias é a conduzida pela indústria cimenteira, que recicla principalmente escórias oriundas da indústria siderúrgica. Deve-se dar destaque à prática de co-processamento, definido como calcinação de resíduos em fornos de cimento, reduzindo o consumo de energia e diminuindo o volume de resíduos em aterros (ANGULO et al., 2001).

A Agenda 21 é um programa de ação para viabilizar a adoção do desenvolvimento sustentável e ambientalmente racional em todos os países. Conforme o documento elaborado por esta, “para que se atinja a maximização do reaproveitamento e da reciclagem dos resíduos, deve-se desenvolver e fortalecer a capacidade nacional de reutilizar e reciclar uma proporção cada vez maior de resíduos. Para isto, é necessário o desenvolvimento de pesquisas que determinem formas de reaproveitamento ou reciclagem de resíduos que sejam vantajosas, rentáveis, socialmente aceitáveis e que estejam adaptadas à realidade de cada país” (AGENDA 21, 1992).

3.2. ESCÓRIA DE ACIARIA

A escória de aciaria é um subproduto gerado durante a produção do aço, podendo ser oriunda de diferentes processos, tais como as geradas nos fornos conversores Linz-Donawitz - LD, ou de arco elétrico - FEA (MANCIO, 2001; MOURA, 2000; NETO, 2004).

Este material pode ser considerado como um resultado da agregação de diversos elementos cuja presença não é interessante no produto aço, sendo esta escória composta basicamente por SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , MgO , MnO , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 e carbono (DELLA et al., 2005; NETO, 2004).

Na Figura 3.2 pode-se observar um depósito de escória de aciaria, enquanto aguarda o processo de reciclagem.



Figura 3.2 - Local utilizado como depósito de escória de aciaria (SILVA e LEITE, 2006).

3.2.1. GERAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA

Os rejeitos siderúrgicos são produzidos durante o processo de fabricação do aço, sendo que as escórias são os resíduos com maior geração, mais de 60% do total. Existem dois tipos de escórias siderúrgicas produzidas em larga escala:

- ⇒ escória de alto-forno: resultante da fusão redutora dos minérios para produção do ferro gusa (retirado diretamente do alto forno, em geral com elevado teor de carbono e várias impurezas), são obtidas em conversores;
- ⇒ escória de aciaria: resultante da produção do aço, são obtidas em fornos elétricos e conversores a oxigênio, durante a conversão em aço. Estas escórias podem ser tanto oxidantes, ou seja, produzidas pela injeção de oxigênio no aço fundido para oxidar carbono, silício e enxofre, quanto redutoras, ou seja, gerada após o vazamento da escória oxidada através da adição de óxido de cálcio (CaO), e de fluorita (CaF₂). Sendo que estes dois compostos são adicionados no processo com o objetivo de dessulfurar o aço líquido e adicionar elementos de liga (BRANCO, 2004; MACHADO, 2000).

Após o processamento do aço, a escória é vazada e levada ainda no estado líquido para um local utilizado como depósito (como mostrado na Figura 3.3), esta é deixada ao ar livre para um resfriamento espontâneo e lento. A solidificação ocorre na forma de blocos com tamanhos bastante distintos, formando-se um material com estrutura interna predominantemente cristalina. Após esta etapa, a escória passa por um processamento, que consiste basicamente na britagem, separação magnética da fração metálica e peneiramento do material, dando origem ao agregado de escória (MANCIO, 2001).

Algumas indústrias adotam o sistema de resfriamento rápido da escória de aciaria, através do processo de granulação, neste a escória ainda líquida é vertida sobre um cilindro dentado giratório, refrigerado por jatos de água fria, que arremessa a escória em grãos para o ar. Este processo gera distribuição variada de grãos, sendo que os de maior diâmetro possuem estrutura porosa e são parcialmente cristalinos, enquanto os grãos menores são similares à areia e possuem composição vítrea (MANCIO, 2001).



Figura 3.3 - Foto do despejo da escória em um local utilizado como depósito (ALMEIDA e SILVA FILHO, 2007).

A produção mundial de aço bruto em 2006, alcançou a cifra de 1,24 bilhões de toneladas registrando um novo recorde de produção (como mostrado na Figura 3.4).

O forte crescimento da produção de aço na China (que registrou 423,4 milhões de toneladas) e o processo de consolidação da indústria siderúrgica mundial, impulsionado pelas aquisições feitas pelas grandes companhias do setor, são fatores que contribuíram para o recorde de produção registrado (CVRD, 2007).

Considerando que em cada tonelada de aço produzido são geradas cerca de 150 kg de escória de aciaria, ou seja, 15% do total produzido, somente no ano de 2006 foram produzidos aproximadamente 186 milhões de toneladas deste resíduo (DELLA et al., 2005).

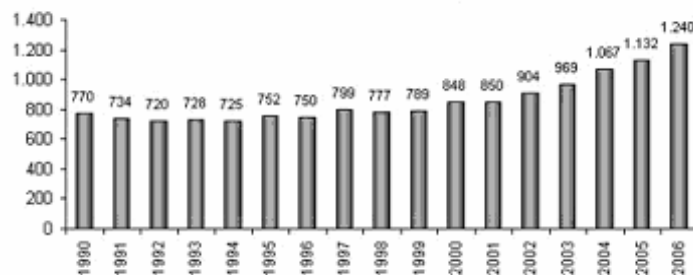


Figura 3.4 - Evolução da produção mundial de aço bruto, em milhões de toneladas (CVRD, 2007).

A Figura 3.5 demonstra a produção mundial de aço bruto (em milhões de toneladas) durante o ano de 2006. Nesta, podemos observar que o Brasil ficou entre os dez maiores produtores de aço bruto do mundo com uma produção de 30,9 milhões de toneladas. Portanto, foram produzidas no território brasileiro aproximadamente 4,6 milhões de toneladas de escória de aciaria (CVRD, 2007).

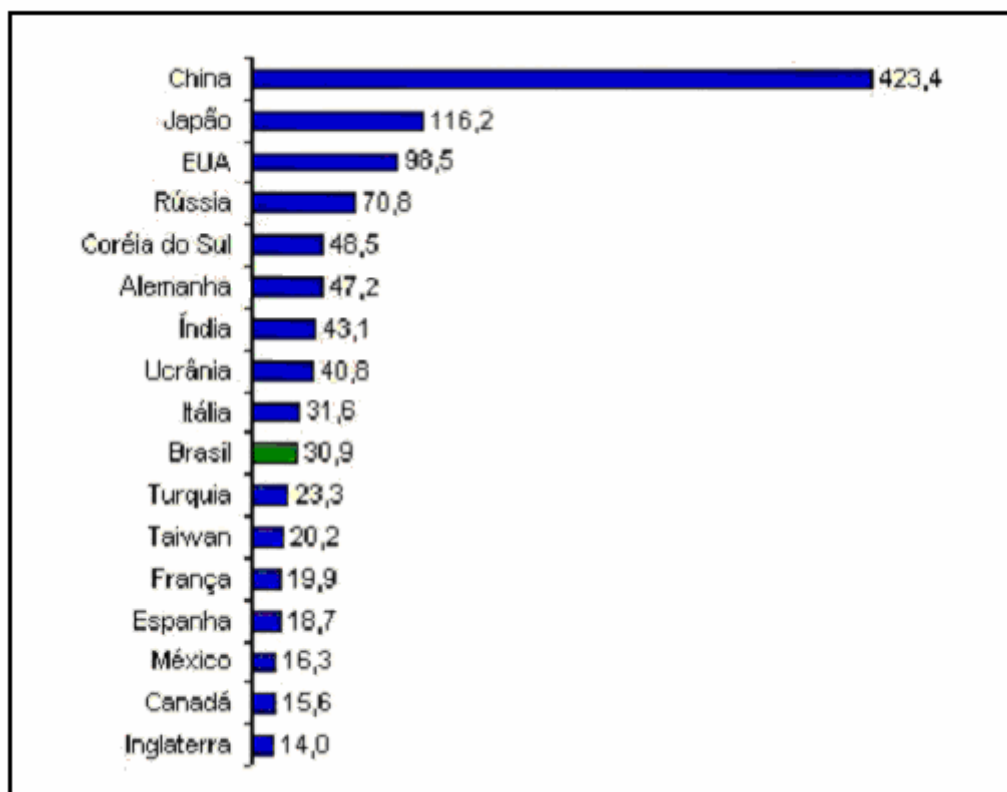


Figura 3.5 - Produção, em milhões de toneladas, de aço em 2006 (CVRD, 2007).

3.2.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ESCÓRIA DE ACIARIA

Durante o processo de produção do aço são eliminados carbono, CaO e os íons de alumínio, silício e fósforo. São estes elementos e compostos eliminados que originam a composição da escória de aciaria. Dentre os compostos que formam a escória estão: silicatos de cálcio (CaSiO_3), óxido de silício (SiO_2), ferrita cálcica (CaFe_2O_4), óxido de magnésio (MgO), além de altos teores de CaO e MgO livres (BRANCO, 2004).

A relação entre cal e sílica (CaO/SiO_2) situa-se geralmente entre 2,5 e 3,5 e a soma total de cal, sílica e óxidos de ferro normalmente compreende entre 85 e 90% da composição das escórias de aciaria (MANCIO, 2001).

A composição da escória depende de diversos fatores, dentre eles: o processo ou tipo de forno utilizado no beneficiamento do aço, a matéria-prima empregada, a especificação do aço produzido, o resfriamento do rejeito, etc (BRANCO, 2004). A Tabela III.3 mostra as composições típicas de algumas escórias de aciaria produzidas, no Brasil, pelos processos de fabricação do aço em conversor a oxigênio (LD) e em forno elétrico (EAF).

Tabela III.3 - Análise química das escórias de aciaria LD e FEA (POLESE et al., 2006).

Compostos/elemento determinados		Técnica	Resultados em massa	
			LD	FEA
Dióxido de silício	SiO ₂	complexometria	10,03	16,47
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	complexometria	1,19	5,76
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	complexometria	31,24	31,02
Óxido de cálcio	CaO	complexometria	39,29	37,78
Óxido de magnésio	MgO	complexometria	8,25	4,81
Anidrido sulfúrico	SO ₃	complexometria	0,19	0,34
Óxido de sódio	Na ₂ O	complexometria	0,01	0,06
Óxido de potássio	K ₂ O	complexometria	n.d.*	0,02
Anidrido fosfórico	P ₂ O ₅	colorimetria	1,92	0,76
Ferro metálico	Fe	absorçãoatômica	n.d.*	0,02
Óxido de cálcio livre	CaO	etileno-glicol	1,73	0,24

*n.d. - não

Os óxidos de cálcio e de magnésio livres, que são os maiores responsáveis pela expansibilidade da escória de aciaria (fator que será discutido adiante), possuem teores mais elevados na escória de aciaria LD, o que leva a pressupor que esta escória, provavelmente, sofrerá maior expansão que a escória de aciaria FEA (POLESE et al., 2006).

3.2.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA ESCÓRIA DE ACIARIA

De uma maneira geral, as escórias de aciaria apresentam massa específica em torno de 3g/cm^3 , possuem forma angular, textura superficial áspera e um teor de absorção de água inferior a 3% da massa total (MANCIO, 2001). A Tabela III.4 apresenta uma média de valores de diversos ensaios de caracterização física e mecânica das escórias de aciaria.

Tabela III.4 - Algumas propriedades da escória de aciaria (MANCIO, 2001).

Propriedades	Valores Típicos
Massa específica	3,2 - 3,6 (g/cm^3)
Massa unitária	1,3 - 1,9 (g/cm^3)
Absorção de água (porcentagem/massa)	< 3 %
Índice de abrasão (ASTM C131)	20 - 25 %
Ensaio de sanidade com Sulfato de sódio	< 12 %
Ângulo de atrito interno	40 - 50°
Dureza (escala Moh)	6 - 7
Índice de suporte Califórnia (CBR)	até 300 %

MANCIO (2001) realizou um estudo comparativo entre o agregado de escória de aciaria e o agregado de rocha granítica, convencionalmente utilizado. O resultado deste estudo mostra que as propriedades dos agregados de escória apresentaram comportamentos semelhantes ou superiores aos agregados de rocha granítica, conforme exemplificado pela Tabela III.5.

Tabela III.5 - Comparação entre agregados de escórias de aciaria e de brita de granito (MANCIO, 2001).

Propriedades	Escória FEA	Escória LD	Brita de Granito
Massa específica (g/cm ³)	3,5	3,3	2,5
Forma (% de partículas alongadas)	< 10	< 10	< 10
Resistência ao impacto (%/massa)	18	22	12
Resistência à britagem (%/massa)	13	15	17
Absorção de água (%/massa)	0,7	1,0	0,5
Resistência ao degelo (%/massa)	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Adesão à matriz (%)	> 90	> 90	> 90

3.2.4. COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DA ESCÓRIA DE ACIARIA

As fases presentes na escória resfriada, e a quantidade relativa entre as mesmas, dependem basicamente do processo de produção do aço e do sistema de resfriamento ao qual a escória foi submetida (MANCIO, 2001).

As principais fases minerais presentes na escória de aciaria são o silicato dicálcico (larnita - β -2CaO.SiO₂), a ferrita dicálcica (2CaO.Fe₂O₃) e a wustita (óxido de ferro - FeO). Além destas fases, também são minerais comuns: olivina (Mg₂SiO₄), mervinita (Ca₃Mg(SiO₄)₂), silicato tricálcico (3CaO.SiO₂), brown millerita (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃), óxido de cálcio livre (CaO) e óxido de magnésio livre (MgO - periclásio) (MANCIO, 2001). A Tabela III.6 traz os pontos de fusão das fases presentes na escória de aciaria.

Tabela III.6 - Pontos de fusão das fases presentes na escória de aciaria
(MACHADO, 2000).

Fase mineral	Fórmula	Fusão (°C)
Silicato dicálcico – Lamita (β -C ₂ S)	$\beta - 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	2130
Silicato tricálcico (C ₃ S)	$3 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	1900
Silicato de magnésio	$\beta - 2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$	-
Ferrita dicálcica	$2 \text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	1430
Mervinita	$\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$	-
Diopsita	$\text{Ca Mg}(\text{SiO}_3)_2$	-
Brown millerita	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	1410
Bredigita	$\alpha - 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	-
Gelenita	$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$	-
Óxidos de alumínio e magnésio	$\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	-
Wüstita (óxido de ferro)	FeO	-
Periclásio (óxido de magnésio)	MgO	2800
Óxido de cálcio	CaO	2570

POLESE et al. (2006) utilizaram o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para obter microfotografias de amostras da escória de aciaria. Alguns de seus resultados estão mostrados na Figura 3.6-A (ferrita de cálcio hidratada nos pontos 1, 2 e 3) e na Figura 3.6-B (silicato dicálcico nos pontos 1 e 3, e silicato tricálcico no ponto 2).

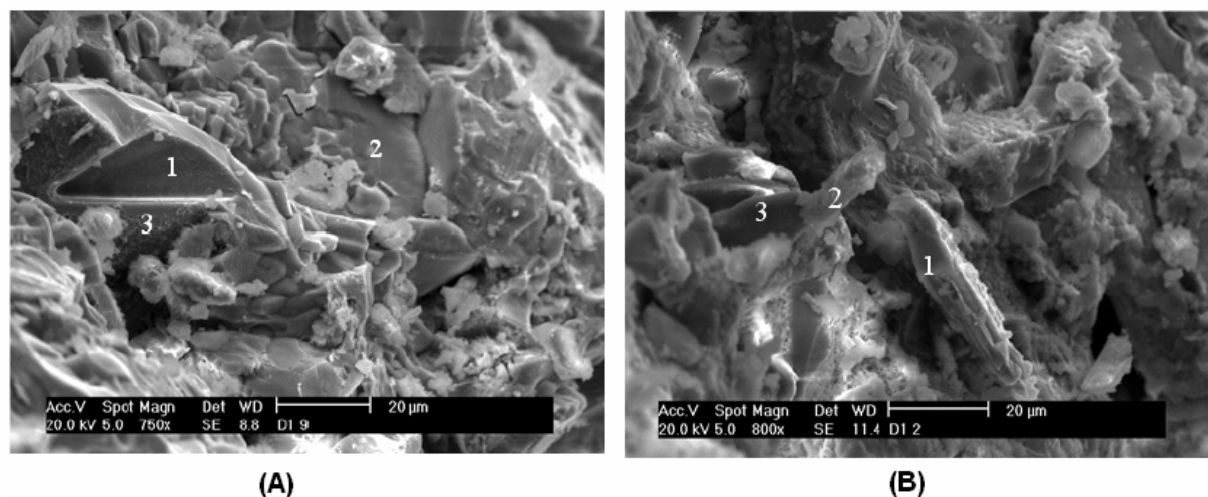


Figura 3.6 - Microfotografias de amostras de escória de aciaria: (A) ferrita de cálcio hidratada nos pontos 1, 2 e 3; (B) silicato dicálcico nos pontos 1 e 3, e silicato tricálcico no ponto 2 (POLESE et al., 2006).

3.2.5. FENÔMENO DA EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA

O principal obstáculo para a utilização das escórias de aciaria em algumas aplicações é a sua instabilidade volumétrica. A garantia da estabilidade desta escória é um ponto fundamental para a sua aplicação, principalmente na construção civil. Este fenômeno pode causar a deterioração prematura de pavimentos, formando fissuras acompanhadas por manchas esbranquiçadas (BRANCO, 2004; MACHADO, 2000). A Figura 3.7 mostra um exemplo dos problemas causados pelo fenômeno da expansibilidade da escória de aciaria.

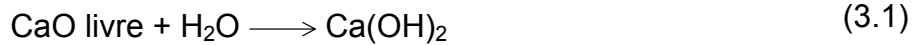


Figura 3.7 - Erupções em uma estrada causada pelo fenômeno da expansibilidade da escória de aciaria (VILELA, 2006).

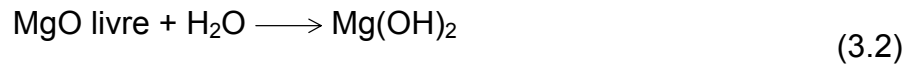
O fenômeno da expansão altera os compostos químicos da escória de aciaria. A característica expansiva desta escória é devida, principalmente, à hidratação da cal livre (CaO) e do periclásio (MgO), além da mudança nas formas alotrópicas do C_2S e da corrosão e oxidação do ferro metálico residual (MACHADO, 2000).

Os principais mecanismos causadores da expansão da escória são (MANCIO, 2001):

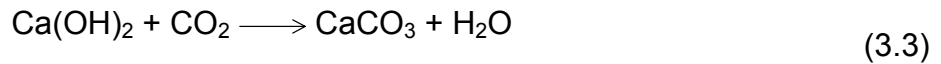
⇒ Hidratação do CaO livre e formação de hidróxido de cálcio:



⇒ Hidratação do MgO livre e formação de hidróxido de magnésio:



⇒ Carbonatação do Ca(OH)₂ (equação 3.1) e formação de carbonato de cálcio:



⇒ Desintegração devido à transformação de fase do silicato dicálcico:



⇒ Oxidação ou corrosão do ferro metálico.

3.2.6. APLICAÇÕES DA ESCÓRIA DE ACIARIA

A indústria siderúrgica é responsável por elevado volume de rejeitos industriais em sua atividade, dentre os quais merecem atenção especial as escórias de aciaria. No Brasil, a falta de uma política efetiva de aproveitamento desses rejeitos vem causando ao longo dos anos sérios problemas ao setor siderúrgico, uma vez que extensas áreas dos parques industriais estão sendo ocupadas por esses materiais, ocasionando custos de disposição. Portanto, o reaproveitamento das escórias de aciaria representa uma solução técnica, econômica e ecológica para as siderúrgicas (MANCIO, 2001).

Atualmente, a escória de aciaria possui algumas aplicações, entretanto, novas pesquisas estão sendo desenvolvidas com o objetivo de encontrar novos mercados para este resíduo, buscando um maior valor para o seu reaproveitamento.

A seguir, são listadas algumas das aplicações em uso das escórias de aciaria (BRANCO, 2004):

- ⇒ produção de fertilizantes agrícolas ou aditivos no cultivo de plantas e algas devido à composição química da escória, que possui elevados teores de CaO e pentóxido de fósforo;
- ⇒ estabilização de solos, por ela apresentar rugosidade superficial, índice de forma, angulosidade, resistência ao desgaste e aumento da resistência dos solos compatíveis com os aditivos encontrados no mercado;
- ⇒ nas próprias siderúrgicas, tanto como material reciclado, que é novamente incorporado ao processo como fundente, quanto como protetor do revestimento refratário dos fornos (substituindo a cal e o calcáreo);
- ⇒ agregado na produção de concreto, por possuir resistência à compressão e durabilidade à abrasão;
- ⇒ construção de lastros no leito de ferrovias, por possuir uma massa específica apropriada a esta utilização;
- ⇒ controle na drenagem de ácidos, por possuir taxas de alcalinidade capazes de neutralizar ácidos;
- ⇒ utilização em estruturas rodoviárias, bem como em forma de cascalho em vias não pavimentadas, para evitar a formação de poeira;
- ⇒ matéria-prima para produção de cimento, devido à presença dos silicatos dicálcico e tricálcico que fornecem ao material uma composição química aproximada a do clínquer formado na produção do cimento Portland;
- ⇒ outros fins, tais como, execução de aterros, construção de peças de quebra-mar, etc.

3.3. RESÍDUO DE GRANITO

A extração de rochas ornamentais vem aumentando expressivamente ao longo dos últimos anos a fim de atender a demanda da construção civil. Atrelado a este processo, a geração de resíduos provenientes do corte de blocos de granito se torna inevitável, chegando em certas situações a representar 50% da produção (RIBEIRO et al., 2004).

3.3.1. O GRANITO

As rochas ornamentais e de revestimento abrangem os tipos litológicos que podem ser extraídos em blocos ou placas, cortados em formas variadas e beneficiados através de esquadrejamento, polimento, lustro, etc. Nesta área destaca-se a classe dos granitos, que são consideradas as rochas ornamentais comercialmente mais importantes, visto que, além de possuírem beleza visual (como pode ser comprovado na Figura 3.8), são resistentes (inclusive a ataques químicos e desgaste abrasivo), não perdendo o brilho de polimento durante longos anos (RIBEIRO et al., 2004).

O granito é composto essencialmente de quartzo, feldspato e mica. Sendo que, feldspato é um termo geral usado para descrever um grupo de minerais de aluminossilicatos contendo sódio, cálcio e potássio (RIBEIRO et al., 2004).



Figura 3.8 - Fotos de pedras de granito: (A) galego e (B) azul (BRISPARGO, 2007).

O processo de extração de granito (ilustrado na Figura 3.9) começa nas pedreiras, onde essa rocha é encontrada na sua forma natural. O granito pode ser extraído de varias maneiras, no entanto, tem-se observado nos últimos anos uma substituição crescente das técnicas de extração baseada na perfuração e explosivo associado ao maçarico (flame-jet), pela combinação de fio diamantado e massa expansiva, que por si só, garante a preservação das características geológicas e tecnológicas da rocha e volume de produção. Os blocos são então levados às serrarias, onde máquinas como os teares cortam os mesmos, transformando-os em placas (RIBEIRO et al., 2004).

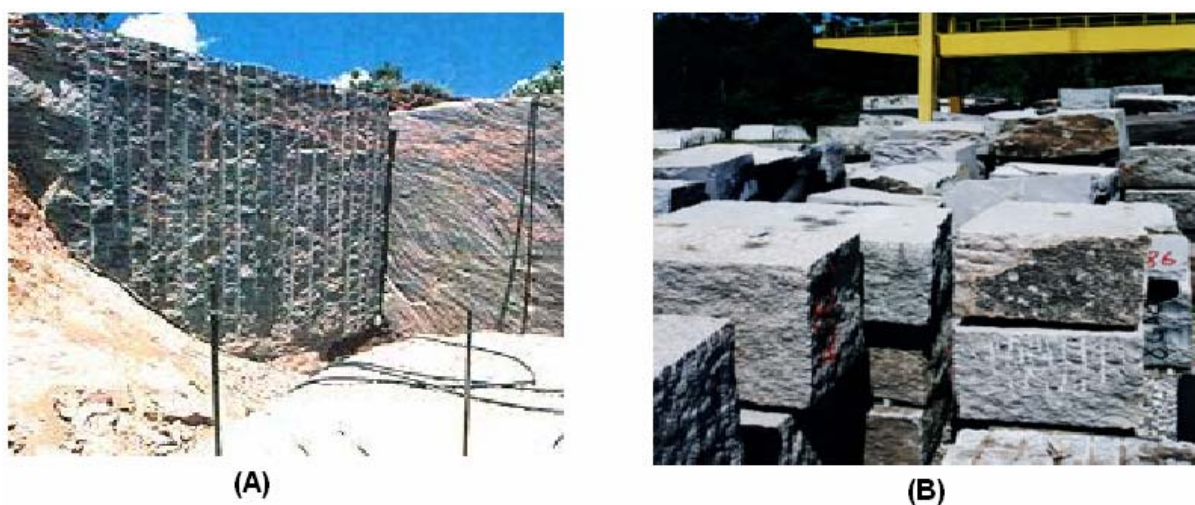


Figura 3.9 - Processo de extração do granito: (A) processo de corte em uma reserva de granito e (B) blocos de granitos extraídos das pedreiras (SANTOS, 2005).

A indústria da mineração e beneficiamento de granitos é uma das mais promissoras áreas de negócio do setor mineral, apresentando um crescimento médio da produção mundial estimado em 6% ao ano, nos últimos anos. Com uma movimentação de aproximadamente US\$ 6 bilhões/ano, no mercado internacional e cerca de US\$ 13 bilhões na cadeia produtiva dos países produtores (FERREIRA et al., 2002).

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de granito, tanto na forma de blocos como em produtos acabados. Tal fato se deve à variedade de reservas de granito existentes no território brasileiro (FERREIRA et al., 2002; MOREIRA et al., 2004).

No Brasil, dentre os estados produtores destacam-se: Espírito Santo, Paraíba, Bahia, Minas Gerais, Ceará, Mato Grosso do Sul, São Paulo e Rio de Janeiro (MOREIRA et al., 2004). A Figura 3.10 mostra a concentração das reservas de granito no território brasileiro.

Somente o estado do Espírito Santo é responsável por cerca de 80% da produção nacional de pedras ornamentais, sendo que o município de Cachoeiro do Itapemirim responde por cerca de 90% da produção deste estado, fazendo com que este setor seja a principal atividade econômica da região, responsável pela geração de milhares de empregos (MOREIRA et al., 2004).

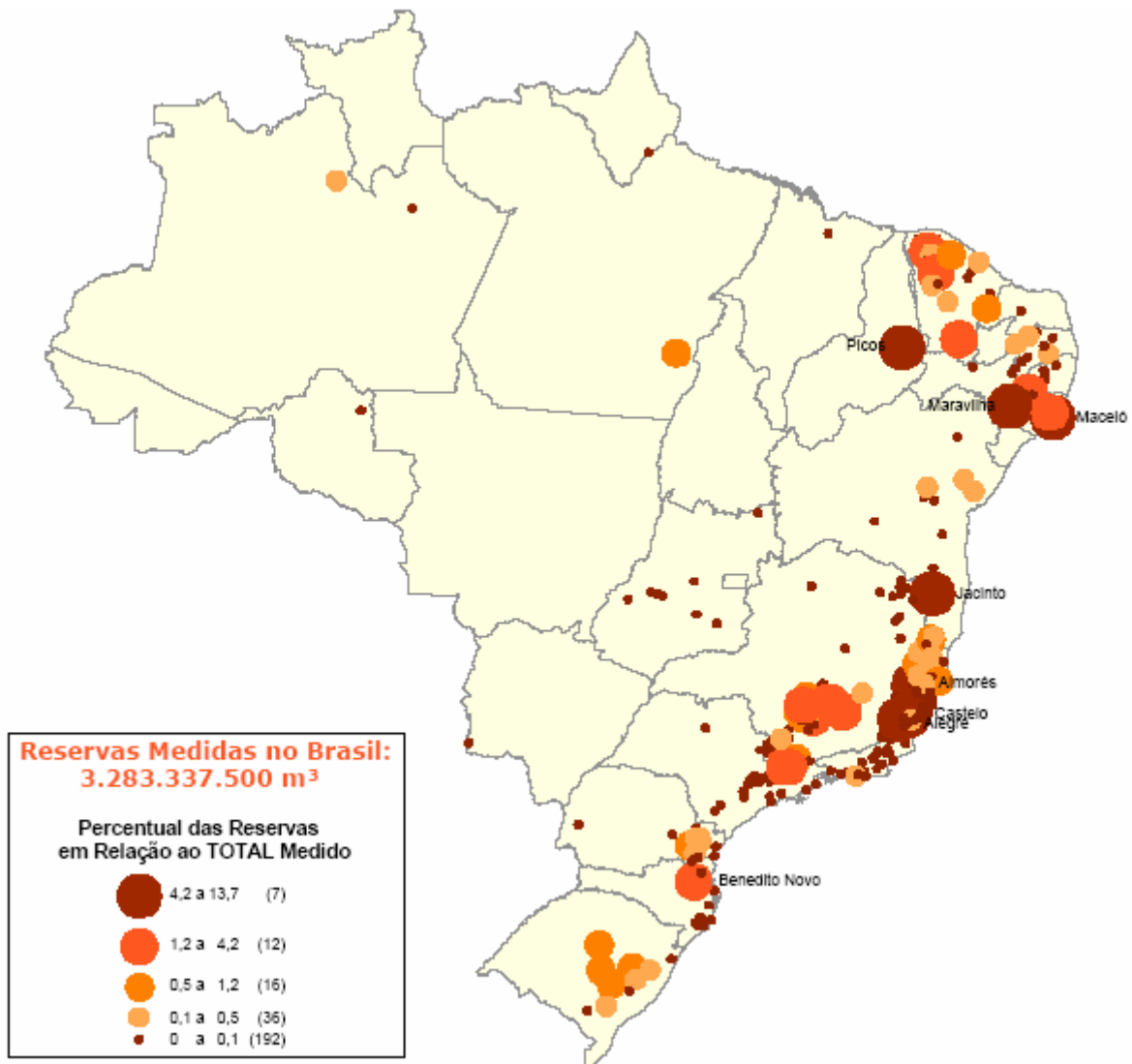


Figura 3.10 - Distribuição das reservas brasileiras de granito (DNPM, 2001).

3.3.2. GERAÇÃO DO RESÍDUO DE GRANITO

Durante o processo de extração do granito, mais especificamente durante o corte da rocha, são gerados resíduos grossos e finos. Estimativas apontam que uma empresa pode produzir aproximadamente 35 toneladas de pó de granito em apenas um mês. Este resíduo deve ser manipulado com atenção, pois caso alcance rios, lagoas, córregos, ou mesmo reservatórios de água, acarretará no assoreamento dos mesmos. Além disso, o resíduo formado apresenta riscos à saúde humana, podendo causar problemas como a silicose. O mesmo ainda pode, quando armazenado em céu aberto, afetar esteticamente a paisagem (MOREIRA et al., 2004; RIBEIRO et al., 2004). A Figura 3.11 ilustra alguns dos problemas citados.



Figura 3.11 - Prejuízos causados pelo mau uso do resíduo de granito: (A) danos à paisagem e (B) assoreamento das margens dos rios (MOTHÉ FILHO et al., 2005).

Nas indústrias de beneficiamento de granito a geração de rejeitos na forma de pó de rocha encontra-se na faixa de 20% a 25% em massa do total beneficiado. Este resíduo apresenta-se na forma de “lama” e possui como constituintes principais: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e CaO (FERREIRA et al., 2002).

A lama quando seca torna-se um resíduo sólido não biodegradável classificado como resíduo classe II - B, inerte (características citadas na Tabela III.1). Este resíduo pode provocar agressões ambientais, caso não seja descartado segundo as normas específicas (FERREIRA et al., 2002; MOREIRA et al., 2004).

3.3.3. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO RESÍDUO DE GRANITO

Assim como a grande maioria dos materiais cerâmicos tradicionais, os resíduos da indústria do granito possuem seus constituintes químicos majoritários, expressos na forma de óxidos: sílica (SiO_2) e a alumina (Al_2O_3), seguidos pela cal (CaO) e os óxidos alcalinos (Na_2O , K_2O). Também podem ser encontrados significativos teores de óxidos de ferro, mas o seu papel durante o processamento não é tão importante, sendo fundentes somente a altas temperaturas (SILVA, 2005).

FERREIRA et al. (2002) estudaram a composição química de 3 tipos de resíduos da serragem do granito oriundos de fábricas de beneficiamento (Poligran, Caxambu e Fuji) do estado da Paraíba (Brasil), obtendo os resultados expressos na Tabela III.7.

Tabela III.7 - Composição química dos resíduos gerados na produção de granito (FERREIRA et al., 2002).

Empresas	Porcentagem em massa (%)							
	Pr*	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O
Poligran	4,44	59,61	5,98	1,77	4,48	-	2,70	3,63
Caxambu	2,93	88,91	-	6,64	-	-	0,14	0,06
Fuji	2,57	60,20	6,30	13,80	6,02	-	3,38	3,63

* Perda ao rubro

CARVALHO et al. (2006) estudaram o rejeito de granito oriundo de uma pedreira da região de Medeiros Neto, na Bahia, Brasil. O resultado da análise química deste rejeito encontra-se na Tabela III.8.

Tabela III.8 - Composição química de resíduos gerados na produção de granito (CARVALHO et al., 2006).

Elementos	Composições (% peso)
SiO_2	70,50
Al_2O_3	18,00
K_2O	5,60
Na_2O	2,70
Fe_2O_3	1,40
CaO	1,20
TiO_2	0,03
MgO	0,10

3.3.4. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO RESÍDUO DE GRANITO

O resíduo da serragem do granito apresenta uma granulometria fina, com aproximadamente 71,65% de materiais com dimensões inferiores a 0,075mm (SOUZA et al., 2003).

Na Tabela III.9 pode-se observar os resultados dos estudos realizados por FERREIRA et al. (2002) que avaliaram três amostras de resíduos de granito oriundos de diferentes fábricas de beneficiamento de granito (Poligran, Caxambu e Fuji) situadas no estado brasileiro da Paraíba. Nesta tabela encontramos a distribuição granulométrica obtida por peneiramento e sedimentação, sendo que todas as amostras possuíam 100% de massa acumulada na peneira ABNT n° 200 (74 μ m).

Tabela III.9 - Distribuição granulométrica por peneiramento e sedimentação dos resíduos (FERREIRA et al., 2002).

Empresas	Massa Acumulada (%)								
	Diâmetro Médio das Partículas (μ m)								
	70	60	50	40	30	20	10	5	2
Poligran	99,0	97,0	96,0	90,0	86,0	77,0	57,0	34,0	15,0
Caxambu	89,0	85,0	79,0	73,0	63,0	48,0	34,0	17,0	7,0
Fuji	80,0	75,0	71,0	65,0	63,0	52,0	36,0	19,0	7,0

FERREIRA et al. (2002) verificaram que os resíduos de granito apresentam características físicas e mineralógicas semelhantes as das matérias-primas cerâmicas convencionais e que corpos cerâmicos formulados com resíduos apresentam características dentro das especificações da normalização brasileira tanto para blocos como para revestimentos cerâmicos.

3.3.5. COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DO RESÍDUO DE GRANITO

Quanto a sua morfologia e estrutura, o resíduo de granito apresenta-se basicamente com três fases distintas:

- ⇒ a fase branca, caracterizada pela presença do elemento ferro (93%) e por outros elementos Si (5%), Ca e Al em menor quantidade, esta fase constitui a fração metálica do resíduo e é composta de partículas de morfologia irregular e superfícies arredondadas;
- ⇒ a fase cinza claro, caracterizada como sendo constituída de outros componentes da mistura abrasiva (cal e resíduo da própria rocha, Si (40%)) possuem morfologia regular e cantos arredondados;
- ⇒ a fase cinza escuro, caracterizada pela presença de elementos da própria rocha granítica, possui a mesma morfologia da fase cinza claro (SOUZA et al., 2003).

SILVA (2005) estudou o comportamento de misturas contendo argila e resíduo de granito. Foi observado que, ao ar, para o sistema com o óxido de ferro (mostrado pela Figura 3.12), o movimento da composição no sentido do resíduo (ou seja, com o aumento da porcentagem deste) não origina mudança no triângulo de compatibilidade de fases sólidas, e nem da temperatura de formação de fase líquida (aproximadamente 1400°C). Entretanto, teores crescentes de resíduo fazem com que a composição da mistura se aproxime do lado mulita-sílica do triângulo, ou seja, a quantidade de líquido formado diminui quando o teor de resíduo aumenta. Já para o sistema com o óxido de cálcio (mostrado pela Figura 3.13) pode-se observar que teores crescentes de resíduo podem levar a composição da mistura do triângulo sílica-mulita-anortita para o triângulo de compatibilidade vizinho sílica-anortita-volastonita, no qual a temperatura inicial de fusão é cerca de 200°C mais baixa (teoricamente, de 1345°C para 1170°C), sendo que, no conjunto de fases compatíveis a mulita é substituída pela volastonita.

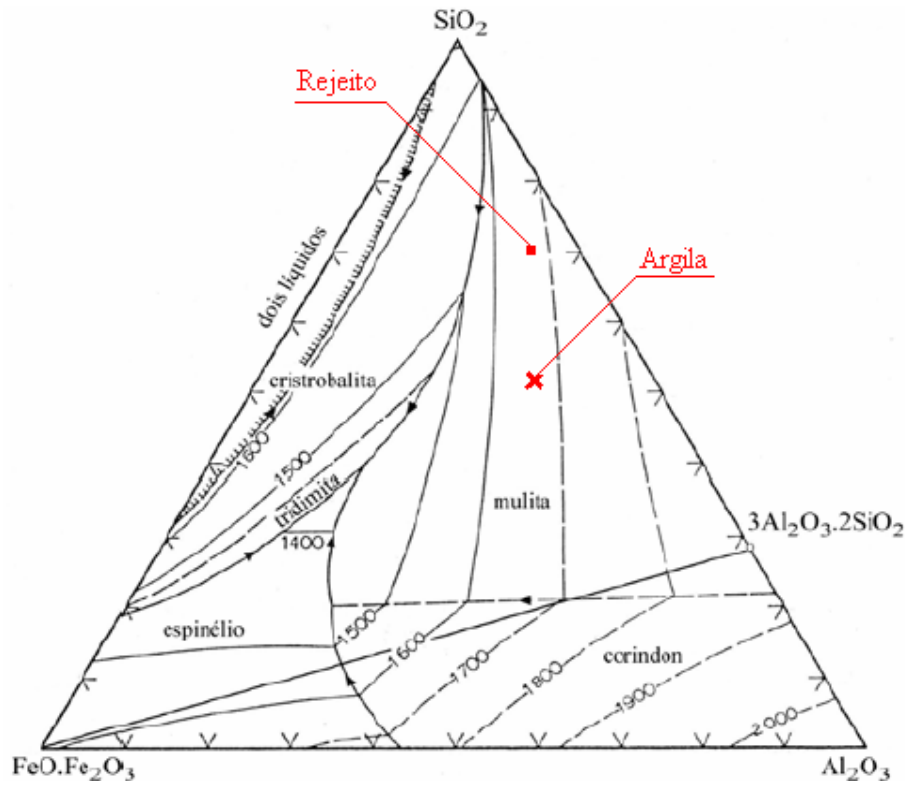


Figura 3.12 - Diagrama de equilíbrio de fases, ao ar, do sistema $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_3\text{O}_4$, mostrando a localização da argila e do rejeito (adaptado de SILVA, 2005).

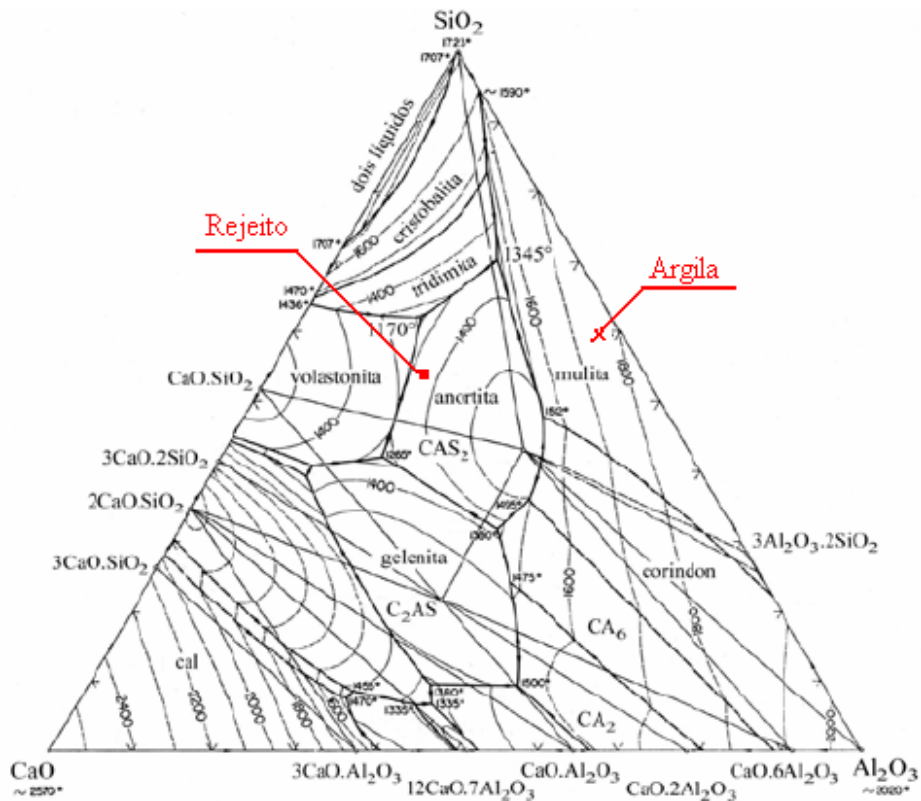


Figura 3.13 - Diagrama de equilíbrio de fases do sistema $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$, mostrando a localização da argila e do rejeito (adaptado de SILVA, 2005).

3.3.6. APLICAÇÕES DO RESÍDUO DE GRANITO

A composição pré-definida (granito moído, cal e granalha de ferro ou aço) e a inexistência de grãos mistos entre os componentes básicos dos resíduos de granito, impulsionaram estudos na viabilidade de utilização dos mesmos em diversos setores da indústria de produção de (CARVALHO et al., 2006; MORAES, 2006):

- ⇒ argamassa (substituindo o calcário, matéria-prima normalmente utilizada nas formulações);
- ⇒ tijolos;
- ⇒ telhas;
- ⇒ concentração de feldspatos para indústria de vidro e cerâmica;
- ⇒ bloquetes para calçamento de ruas e calçadas.

Outra aplicação para os resíduos de granito é como substituto dos agregados minerais que constituem a mistura asfáltica (Figura 3.14), cujo uso reduz os custos da produção do pavimento e o impacto ambiental causado por esses rejeitos (SOUZA et al., 2003).



Figura 3.14 - Utilização do resíduo de granito em mistura asfáltica (SOUZA et al., 2003).

3.4. LÃ MINERAL

As lãs minerais são um tipo de fibra amorfa formada por silicatos, sendo a sua fabricação feita a partir de vidro, rocha ou outro mineral. Devido às suas características termo-acústicas, este material atende aos mercados de construção civil, industrial, automotivo, eletro-eletrônico, entre outros (LUOTO et al., 1998). Outra importante qualidade das lãs minerais é o fato de que estas não propagam chamas, não emitem fumaças tóxicas e possuem elevada resistência ao fogo (MARABINI et al., 1998).

Existem diversos tipos de lã (cerâmica, de amianto, de vidro e de rocha). Elas possuem aplicações semelhantes, entretanto as lãs cerâmicas e de amianto se encontram em desuso devido a sua ligação com diversas doenças, entre elas o câncer. As lãs de vidro e de rocha não possuem tal adversidade, em outubro de 2001, a *International Agency for Research on Cancer* (IARC), órgão subordinado a ONU, reclassificou estas lãs para o chamado grupo III de produtos, ou seja, os não-cancerígenos para os seres humanos. Antes disto, a IARC classificava estas lãs como pertencentes ao grupo 2B, de produtos possivelmente cancerígenos, no qual ainda se encontram as lãs cerâmicas e de amianto. Para chegar a esta conclusão, a IARC levou em conta a biossolubilidade das partículas inaláveis das lãs (BAAN, 2004; N.T.P, 1994; WILSON et al., 1999).

As lãs de rocha e de vidro possuem mercado consumidor tanto industrial como residencial, com destaque para o isolamento termo-acústico. Estes materiais possuem estrutura vítrea e como tal, suportam quantidades de diferentes elementos em solução, sendo, portanto, ideais para assimilar escórias complexas em suas composições. Tal fato faz com que estes materiais possam ser utilizados como uma forma de reaproveitamento de resíduos industriais (FERREIRA et al., 2002-a).

As escórias ricas em sílica podem ser refundidas com adição de calcário, dolomita ou cascalho e areia, e resfriadas rapidamente para obtenção de lã mineral (MOURA, 2000). As escórias metalúrgicas podem ser utilizadas na produção de diversos materiais de construção, entre estes a lã mineral, que pode ser obtida através da fusão da escória misturada com aditivos (PIORO L. e PIORO I., 2004).

FERREIRA et al. (2002-a) desenvolveram vidros e, posteriormente, vitrocerâmicas, utilizando a escória de aciaria como matéria-prima principal. Estes concluíram que é possível obter vidros a partir de escória de aciaria, com o devido ajuste da composição química da mistura através de adições de areia e carbonato de sódio. O material resultante do trabalho citado pode ser observado na Figura 3.15.



Figura 3.15 - Amostras de vidro e vitrocerâmica, polida e sem polimento, produzidas a partir da escória de aciaria (FERREIRA et al., 2002-a).

3.4.1. PRODUÇÃO DAS LÃS DE VIDRO E DE ROCHA

Os processos de produção das lãs de vidro e de rocha são semelhantes, a diferença entre estes dois materiais se deve à matéria-prima utilizada em cada caso.

- Lã de vidro: são feitas a partir de vidro fundido de carbonato de sódio e cal. Sua matéria-prima principal é o vidro borossilicato (fabricado através da adição de boro aos componentes tradicionais do vidro), além de outros componentes utilizados para dar características específicas (BUCK, 1997; ROCHA, 1998; TRDIC et al., 1999).
- Lã de rocha: a principal matéria-prima utilizada na produção deste material são as rochas basálticas. Pode ser necessário adicionar calcário ou outros elementos, de modo a corrigir eventuais desvios na composição química do basalto (DNPM, 2001; JURY, 1997; TRDIC et al., 1999).

A produção das lãs inicia-se com a fusão das matérias-primas. Devido às elevadas temperaturas necessárias para fundir os componentes empregados (entre 1400° C e 1500° C) é necessário o emprego de fornos especiais (LABRINCHA, 2006; TERMOLAN, 2005).

Após a fusão, o material fundido é ejetado por orifícios, devido a pressão de um gás (argônio ou nitrogênio), sobre um disco giratório de metal resfriado, que gira com uma determinada velocidade angular. Assim, o material é resfriado bruscamente, originando as fibras, estas são extraídas do disco (através de um jato de ar) e posteriormente lançadas em uma câmara coletora, na qual são pulverizadas com aglutinante (dependendo do produto final desejado também pode ser utilizada uma mistura de óleo solúvel, água e silicone). Esta técnica é conhecida como *Melt Spinning* (LABRINCHA, 2006; ROCHA, 1998; TRDIC et al., 1999; UEDA et al., 1999).

A Figura 3.16 traz uma ilustração da técnica *Melt Spinning* (fiação por fusão), em destaque é demonstrado uma imagem do vazamento do material fundido através dos orifícios. Quanto menor for o diâmetro dos orifícios, menor será a dimensão das lãs formadas.

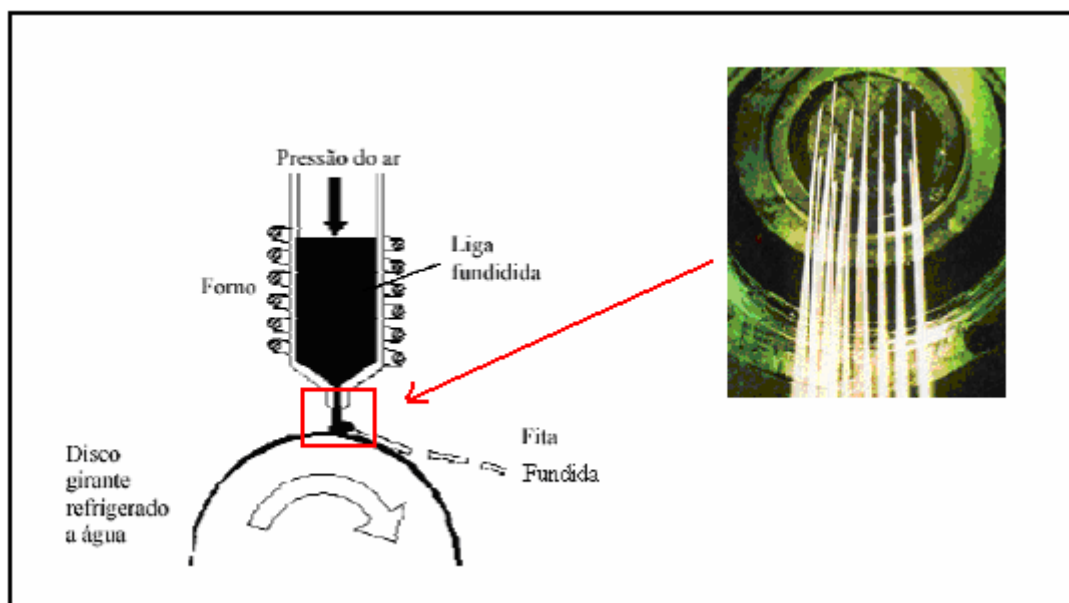


Figura 3.16 - Representação da técnica *Melt Spinning* (adaptado de AFMA, 2007; TRDIC et al., 1999)

Após o material passar pelo processo de *Melt Spinning*, a camada de lã é colocada em uma estufa de cura, onde esta é exposta ao ar quente com temperaturas entre 250 e 285°C, e comprimida por um cilindro até a espessura desejada.

Por fim, a lã é moldada, aparada e embalada de acordo com as dimensões e formatos requeridos pelo cliente. Uma segunda camada de um material auxiliar, como o PVC por exemplo, pode ser aplicada para dar um melhor acabamento (LABRINCHA, 2006; TERMOLAN, 2005). A Figura 3.17 mostra diversos tipos de lãs de vidro e de rocha comercializadas atualmente.

Os resíduos das lãs gerados durante a produção são classificados como Classe II-A, não perigoso e não inerte, conforme a NBR 10004:2004 (detalhes na Tabela III.1). A melhor opção para destinar estes resíduos são os aterros industriais classe II. Por sua vez, as embalagens usadas dos produtos de lã de vidro e de rocha (sacos plásticos e caixas de papelão sem sobras das lãs) podem ser destinadas, sem restrições, para a reciclagem (BORGES, 2007; ISOVER, 2007).



Figura 3.17 - Produtos comercializados atualmente: (A) manta de lã de vidro, (B) flocos de lã de rocha, (C) mantas de lã de rocha e (D) painéis rígidos de lã de vidro (ISOVER, 2005; ROCKFIBRAS, 2007).

3.4.2. PROPRIEDADES E APLICAÇÕES DAS LÃS DE ROCHA E DE VIDRO

Apesar da diferença entre as matérias-primas utilizadas em suas produções, as lãs de vidro e de rocha possuem propriedades e aplicações semelhantes, variando basicamente na faixa de temperatura na qual cada uma pode ser empregada.

São características das lãs de vidro e de rocha (DNPM, 2001; ISOVER, 2005; LABRINCHA, 2006):

- ✓ isolamento térmica;
- ✓ absorção acústica;
- ✓ não propagam chamas;
- ✓ são imputrescíveis;
- ✓ são dimensionalmente estáveis mesmo em altas temperaturas;
- ✓ fáceis de recortar e aplicar;
- ✓ não absorvem umidade e não sofrem danos estruturais;
- ✓ não quebram facilmente, reduzindo as perdas nas obras;
- ✓ não são atacadas por roedores ou insetos;
- ✓ não atacam as superfícies com as quais venham a entrar em contato;
- ✓ não depositam quando submetidos a vibrações;
- ✓ ausência total de partículas não fibradas.

Por serem materiais fibrosos, as lãs de vidro e de rocha estão entre os melhores materiais para o tratamento acústico. Estas podem ser utilizadas na construção de barreiras para evitar a transferência de uma onda sonora (ruído) de um ambiente para o outro ou na absorção acústica, que é um tratamento aplicado para melhorar a qualidade acústica dos ambientes, recurso muito utilizado em estúdios de gravadoras, por exemplo (LABRINCHA, 2006).

Quando uma onda sonora entra em contato com estas lãs, ela é facilmente absorvida, devido à porosidade do material. Além disso, ocorre uma fricção entre a onda e a superfície das fibras, fazendo com que parte da energia sonora seja convertida em calor, ou seja, a lã faz com que a energia sonora perca intensidade, o que resulta em um aumento da absorção ou da isolamento sonora (LABRINCHA, 2006).

Como dito anteriormente, as lãs de vidro e de rocha possuem sua principal aplicação no isolamento térmico de diversos setores. Neste aspecto, a lã de rocha possui valores bem superiores da lã de vidro, fazendo com que esta tenha maior aplicação industrial, enquanto a lã de vidro é mais utilizada em residências.

A Tabela III.10 mostra os valores de temperatura máxima de trabalho para diferentes isolantes térmicos encontrados no mercado. Nesta podemos observar que a lã de rocha suporta temperaturas três vezes superiores a da lã de vidro, e que estas duas lãs destacam-se neste quesito quando comparadas aos demais isolantes.

Tabela III.10 - Temperatura máxima de utilização de alguns materiais isolantes (LABRINCHA, 2006).

Material Isolante		Temperatura máxima de utilização (°C)
Lã de rocha		1750
Lã de vidro	sem resina	500
	com resina	250
Espuma de poliuretano		100
Poliestireno expandido		70

As lãs de rocha e de vidro podem ser aplicadas no interior de paredes (Figura 3.18-A), ou como parte do ambiente (Figura 3.18-B) sendo que, neste último caso, é aplicada uma cobertura de algum material para dar o acabamento final.

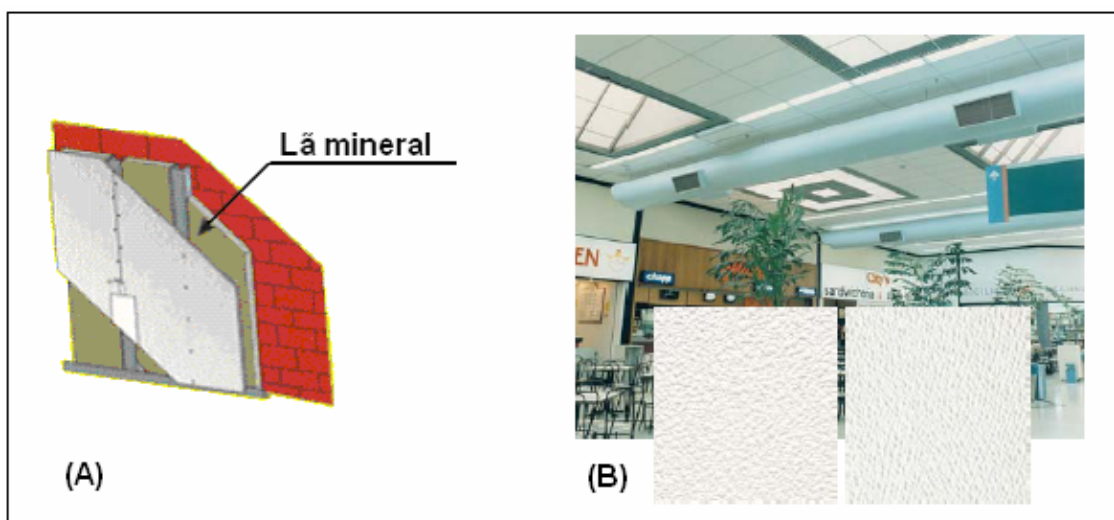


Figura 3.18 - Utilização de lã mineral para isolamento termo-acústico: (A) no interior da parede e (B) exposta como parte do teto (TERMOLAN, 2005).

3.4.3. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS LÃS DE VIDRO E DE ROCHA

Embora com diferenças na porcentagem, a sílica (SiO_2), é o principal componente das lãs de vidro e de rocha. A lã de vidro apresenta uma relação SiO_2/CaO maior do que a lã de rocha. A quantidade de Fe_2O_3 admitida na composição da lã de rocha é superior a da lã de vidro. Uma análise das composições químicas da lã de vidro e da lã de rocha encontradas na literatura pode ser feita observando a Tabela III.11 e a Tabela III.12.

Tabela III.11 - Composição química, em % de peso, da lã de vidro segundo diferentes autores (BRAGA 1991; BUCK, 1997; LUOTO et al., 1998).

<u>Lã de Vidro</u>	LUOTO et al. (1998)	BUCK (1997)	BRAGA (1991)
SiO_2	64,4	34,0 - 73,0	60,0 - 70,0
CaO	7,4	0,0 - 22,0	6,0 - 9,0
MgO	3,2	0,0 - 5,5	3,0 - 4,0
Al_2O_3	2,9	3,0 - 14,5	1,0 - 3,0
Fe_2O_3	0,3	0,0 - 2,0	0,2 - 0,4
Na_2O	15,4	0,5 - 16,0	12,0 - 15,0
K_2O	1,4	0,0 - 3,5	0,0
TiO_2	0,1	0,0 - 0,8	0,0
B_2O_3	4,9	0,0 - 8,5	5,0 - 3,0

Tabela III.12 - Composição química, em % de peso, da lã de rocha segundo diferentes autores (BRAGA 1991; JURY, 1997; LUOTO et al., 1998).

<u>Lã de Rocha</u>	LUOTO et al. (1998)	BUCK (1997)	JURY (1997)
SiO_2	45,9	45,0 - 52,0	41,0 - 44,0
CaO	18,5	10,0 - 12,0	10,0 - 12,0
MgO	11,6	8,0 - 15,0	6,0 - 7,0
Al_2O_3	11,9	8,0 - 13,5	14,0 - 15,0
MnO	0,0	0,1 - 0,3	0,0 - 0,2
Fe_2O_3	8,2	5,5 - 6,5	12,0 - 13,0
Na_2O	1,8	0,8 - 3,3	3,0 - 4,0
K_2O	0,6	0,8 - 2,0	1,0 - 1,5
TiO_2	0,9	1,5 - 2,7	3,0 - 3,5

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos experimentais relacionados a este trabalho foram realizados nos laboratórios do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). As análises de difração de raios-X foram realizadas no Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP).

Um resumo das atividades desenvolvidas pode ser observado no fluxograma mostrado na Figura 4.1.

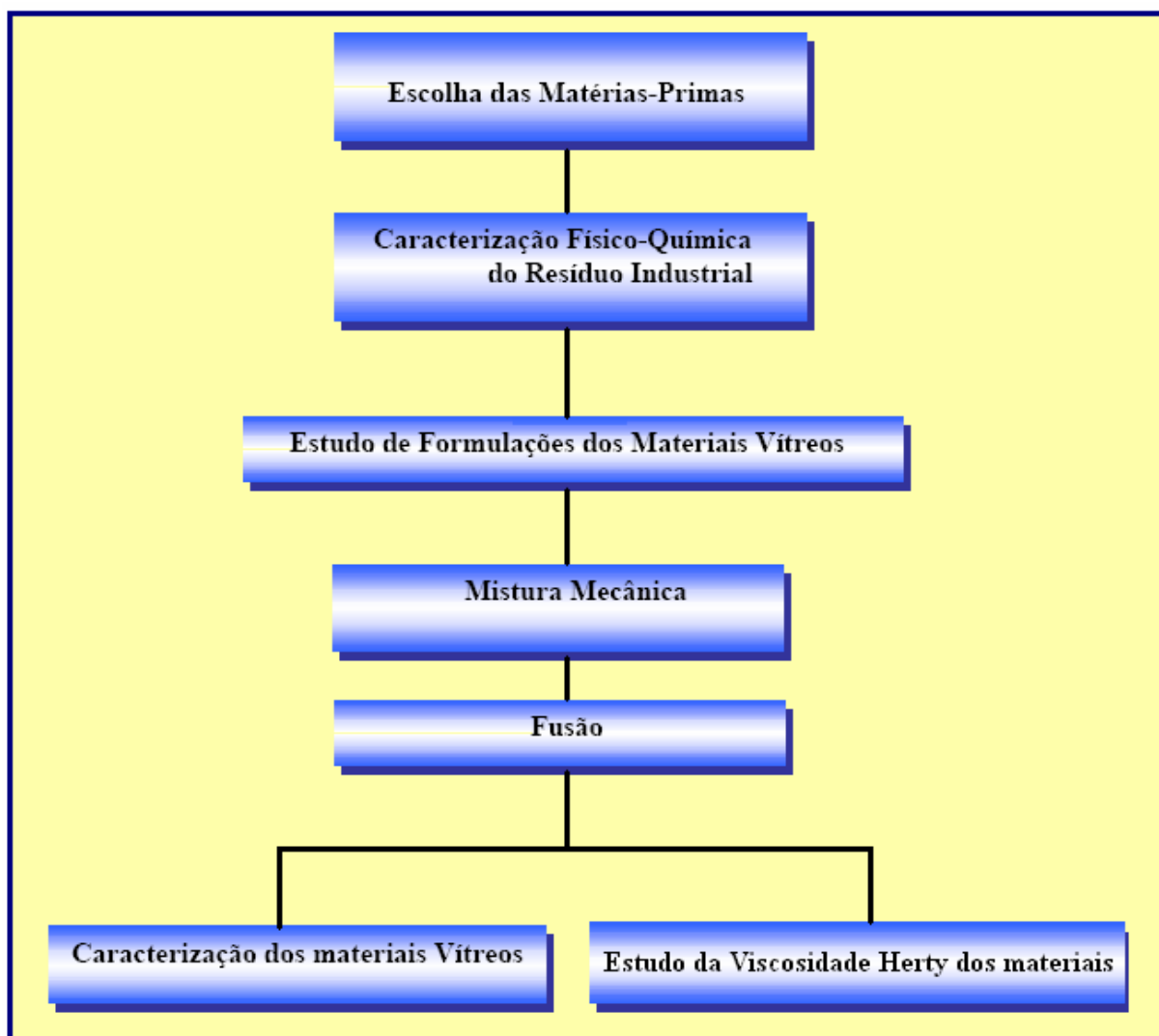


Figura 4.1 - Fluxograma que resume as atividades realizadas.

4.1. AQUISIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

As matérias-primas utilizadas neste trabalho foram:

- escória de aciaria proveniente de Forno Elétrico a Arco - FEA (Figura 4.2);
- resíduo de corte do granito de uma reserva do Espírito Santo (Figura 4.3);
- reagentes químicos: sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de magnésio (MgO), óxido de ferro (Fe_2O_3), carbonato de cálcio ($\text{CaCO}_3 = 53,0\%$ de CaO e $44,0\%$ de CO_2) e Bórax ($16,25\%$ de Na_2O , $36,51\%$ de B_2O_3 e $47,24\%$ de H_2O).



Figura 4.2 - Escória de aciaria utilizada no trabalho.



Figura 4.3 - Resíduo do corte de granito utilizado no trabalho.

A caracterização química dos resíduos foi realizada no Laboratório de Química Analítica da empresa CELQA - Análises Técnicas Ltda, localizada em Sorocaba-SP.

Durante a caracterização química foram utilizados dois gramas de cada amostra. As técnicas empregadas foram:

- fluorização / gravimetria para a determinação do teor de silício;
- fotometria de chama (utilizando um Fotômetro Micronal B-262) para a determinação dos teores de sódio e potássio;
- calorimetria (utilizando um Espectrômetro Micronal B-380) para a determinação do teor de boro;
- aquecimento em estufa (temperatura de 105°C) para a determinação da umidade;
- espectrofotometria absorção atômica (utilizando um Espectro Perkin Elmer 2380) para a determinação dos teores dos demais elementos.

4.2. ELABORAÇÃO DAS MISTURAS DAS MATÉRIAS-PRIMAS

As diferentes misturas das matérias-primas foram feitas visando a maior aproximação possível das composições químicas das lãs de vidro e de rocha encontradas na literatura (vide Tabelas III.11 e III.12).

As propriedades dos materiais vítreos, assim como de todos os outros materiais, dependem das suas características estruturais. A estrutura por sua vez, esta condicionada principalmente à composição química. A variação das propriedades com a composição pode ser avaliada, aproximadamente, em função da concentração dos óxidos componentes (AKERMAN, 2000).

Os óxidos podem ser divididos de acordo com a função que cada um exerce na composição final do material vítreo. Sendo assim, podemos dividi-los em (MAGELLA, 1999):

- vitrificantes: SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 ;
- fundentes: Na_2O , CaO , K_2O , PbO , B_2O_3 , Li_2O ;
- estabilizantes: BaO , MgO , PbO , Al_2O_3 , ZnO ;
- devitrificantes: ZnO , MgO , BaO , ZrO_2 , TiO_2 .

Na formulação das misturas realizadas neste trabalho foram observados os principais constituintes das lãs de vidro e de rocha, procurando dar ao material fabricado uma mesma porcentagem de cada grupo de funções dos óxidos.

Para a distribuição das porcentagens deste trabalho, foi elaborada uma tabela utilizando-se o software Excel de acordo com as propriedades dos óxidos ilustradas na Figura 4.4. Pode-se observar nesta (de uma maneira qualitativa) como variam as propriedades dos materiais vítreos em relação ao aumento ou diminuição de um de seus óxidos constituintes. Por exemplo, aumentando-se o Na_2O (óxido de sódio) do vidro aumenta-se a sua fluidez, expansão e solubilidade, mas por outro lado a sua durabilidade diminui. Portanto, é necessário uma compensação caso haja a diminuição ou aumento da porcentagem total dos óxidos presentes em cada grupo (AKERMAN, 2000).

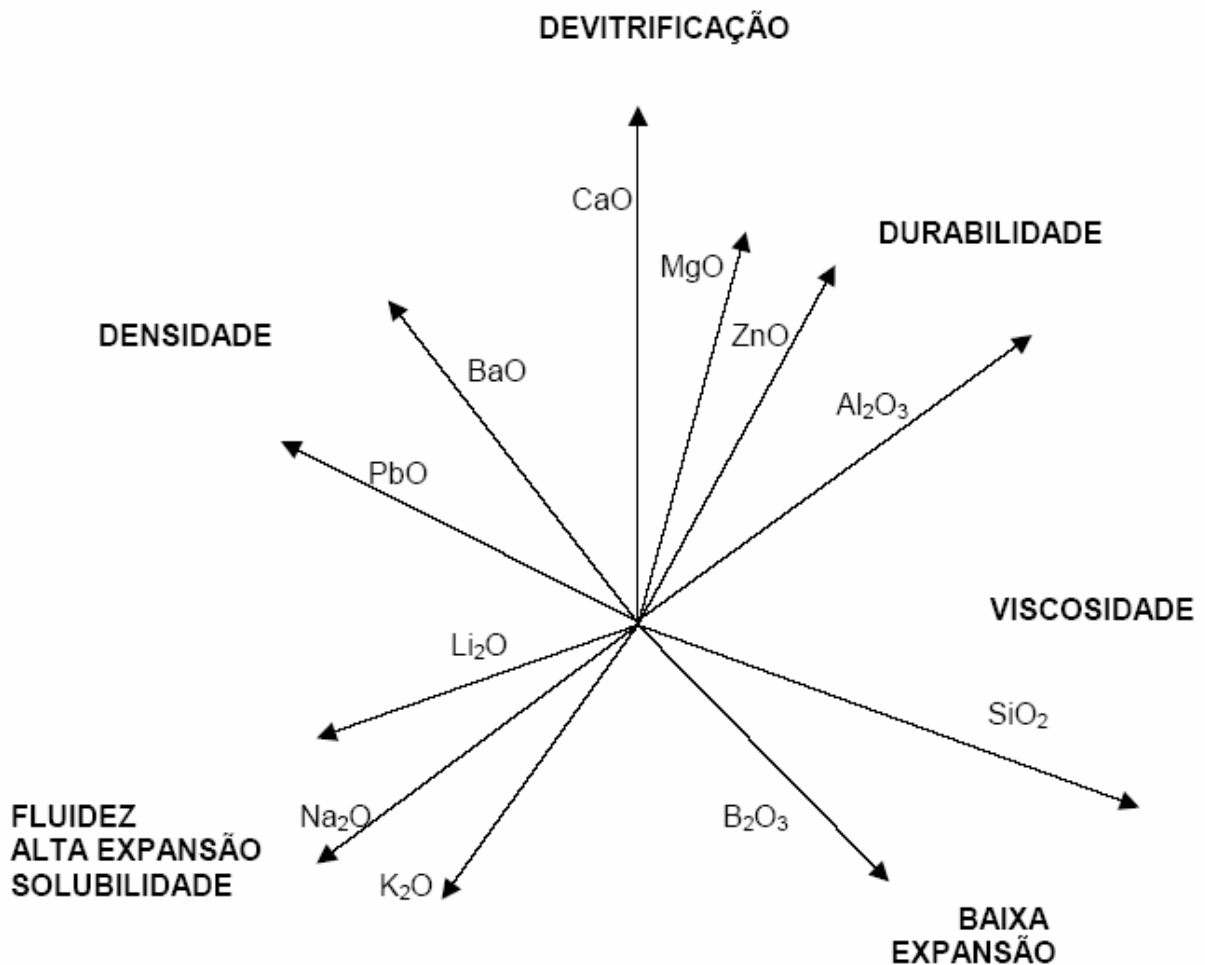


Figura 4.4 - Funções relativas dos óxidos nos materiais vítreos (AKERMAN, 2000).

Foram realizados três tipos de combinações das matérias-primas, sendo que, para cada combinação foram formuladas duas composições diferentes (uma visando a produção de Lã de Vidro e a outra visando a produção de Lã de Rocha), totalizando o número de seis misturas diferentes (como pode ser observado na Figura 4.5).

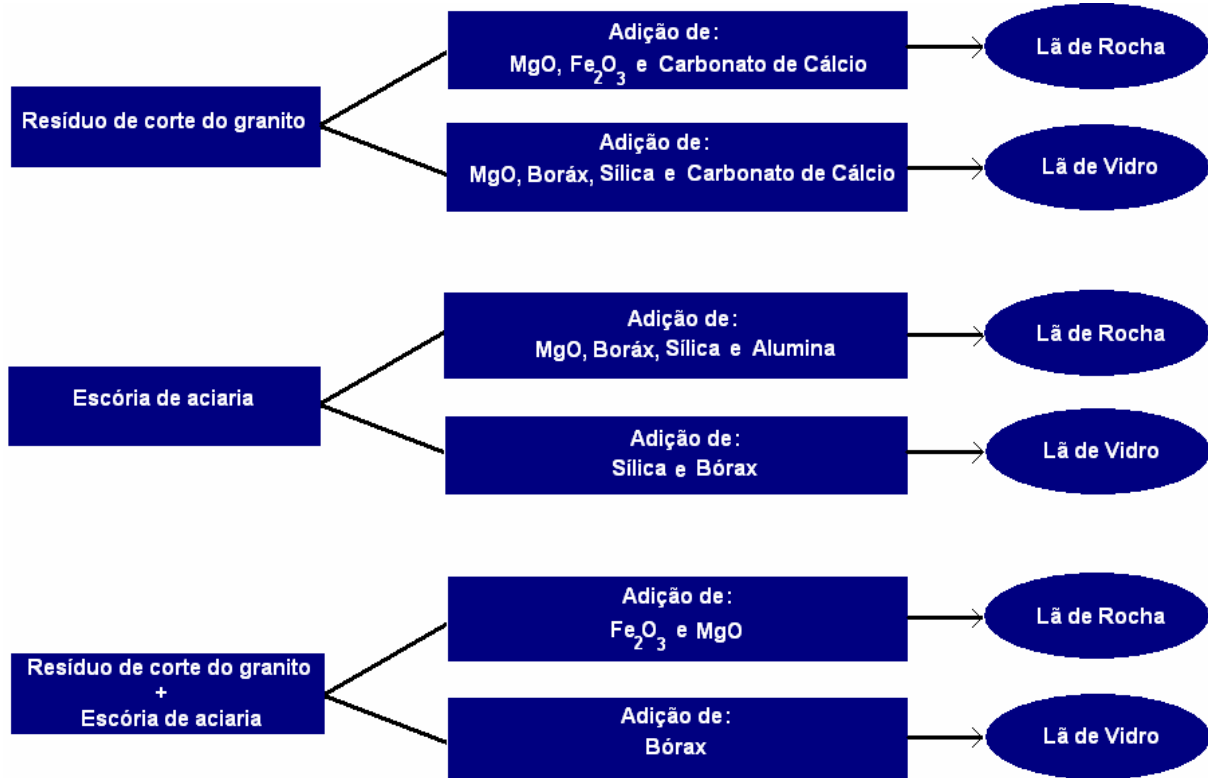


Figura 4.5 - Combinações de matérias-primas realizadas.

Para a pesagem dos componentes das misturas foi utilizada uma balança da empresa Marte modelo AS 5500C, com menor divisão de 0,001g.

A homogeneização dos componentes das misturas foi realizada em um agitador do tipo Eirich. Os materiais foram agitados durante dez minutos na velocidade de rotação 1 do equipamento.

A escória de aciaria passou por um processo de preparação no qual foi realizada a seleção visual das partes mais homogêneas, em seguida a escória foi fragmentada utilizando-se um almofariz de alumina. Por fim, o material passou por uma peneira do tipo ABNT - 4 (abertura de 4,76mm), sendo utilizado o material passante.

4.2.1. COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS COM O RESÍDUO DE GRANITO COMO MATÉRIA-PRIMA PRINCIPAL

Com o objetivo de utilizar a maior quantidade possível do resíduo do corte de granito para a obtenção das lãs, foram elaboradas duas misturas, uma visando a produção de lã de rocha (mistura “A”) e outra visando a produção de lã de vidro (mistura “B”). A Tabela IV.1 mostra a quantidade dos elementos adicionados.

Tabela IV.1 - Quantidade dos elementos adicionados para as misturas com o resíduo de granito como matéria-prima principal.

Mistura	Material a ser Produzido	Quantidade dos elementos (em gramas)					
		Resíduo	CaCO ₃	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	Bórax
A	Lã de Rocha	700	240	---	70	50	---
B	Lã de Vidro	700	45	110	20	---	300

4.2.2. COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS COM A ESCÓRIA DE ACIARIA COMO MATÉRIA-PRIMA PRINCIPAL

As misturas “C” e “D” foram elaboradas visando à produção das lãs de rocha e de vidro, respectivamente. A escória de aciaria foi a matéria-prima utilizada, juntamente com outros elementos químicos que podem ser observados na Tabela IV.2.

Tabela IV.2 - Quantidade dos elementos adicionados para as misturas com a escória de aciaria como matéria-prima principal.

Mistura	Material a ser Produzido	Quantidade dos elementos (em gramas)				
		Escória	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Bórax
C	Lã de Rocha	700	400	80	80	60
D	Lã de Vidro	300	500	---	---	200

4.2.3. COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS COM O RESÍDUO DE GRANITO E A ESCÓRIA DE ACIARIA COMO MATÉRIAS-PRIMAS PRINCIPAIS

A utilização em conjunto dos dois resíduos industriais foi testada através das misturas “E” (visando a obtenção de lã de rocha) e “F” (visando a obtenção de lã de vidro). Na Tabela IV.3 pode-se observar a quantidade de cada elemento adicionado para a elaboração das misturas (valores expressos em gramas).

Tabela IV.3 - Quantidade dos elementos adicionados para as misturas com o resíduo de granito e a escória de aciaria como matérias-primas principais.

Mistura	Material a ser Produzido	Quantidade dos elementos (em gramas)					
		Resíduo	Escória	CaCO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Bórax
E	Lã de Rocha	500	250	240	70	30	---
F	Lã de Vidro	750	250	---	---	---	300

4.3. A FUSÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Para a fusão dos materiais constituintes das lãs de vidro e de rocha são necessárias altas temperaturas de trabalho, entre 1400 e 1500°C, dependendo da composição e da aplicação final para o qual o material será destinado.

Devido às altas temperaturas requeridas para a realização deste trabalho, foi realizado um estudo dos fornos disponíveis entre os parceiros da REDEMAT. Um outro fator que causa restrição ao forno a ser utilizado, é que o material a ser produzido não é condutor elétrico, o que impossibilita o uso de fornos de indução.

O forno que melhor se adequou às exigências do trabalho foi o forno a arco elétrico do tipo Detroit, que se encontra no Hall Tecnológico Prof. Dr. Carlos Dias Brosch do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). Este forno atinge temperaturas acima de 1700°C, além de possuir uma facilidade de vazamento do material (o que é bastante interessante, pois facilita o resfriamento brusco).

4.3.1. O FORNO DETROIT

O forno Detroit utilizado no trabalho é do tipo a arco elétrico e funciona através da dissipação de calor causada por uma corrente elétrica que passa por dois eletrodos situados no interior do forno.

Neste trabalho foram utilizados dois pares de eletrodos de grafite (grau BEPC) fornecidos pela empresa Egyper Carbon Ltda que possuíam diâmetro de 1" por 1000mm de comprimento (os eletrodos são desgastados com a utilização).

Quando os dois eletrodos estão afastados um do outro, existe uma resistência do ar que impede a passagem da corrente elétrica (esquema mostrado na Figura 4.6-A). Com o estabelecimento de um contato entre os eletrodos, estes são submetidos a uma tensão elétrica, passando uma alta corrente elétrica através deles (esquema mostrado na Figura 4.6-B). Caso a tensão elétrica seja suficiente para vencer a resistência do ar (são necessários cerca de 30.000 V/cm), o ar entre os eletrodos ioniza-se (as moléculas de ar tornam-se condutoras elétricas) e um arco elétrico é estabelecido no interior do forno (esquema mostrado na Figura 4.6-C).

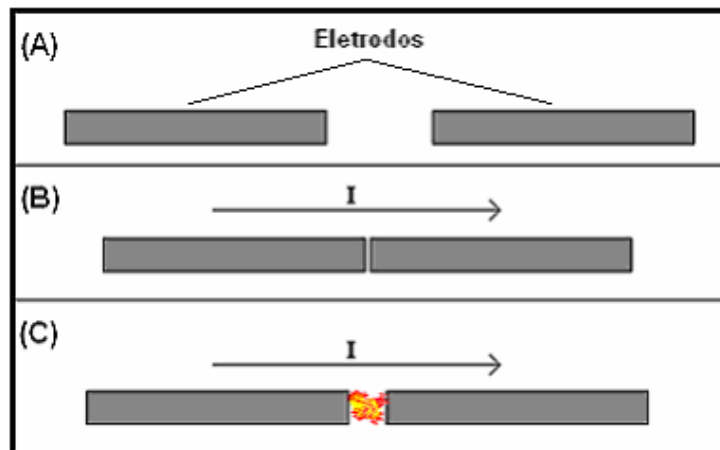


Figura 4.6 - Etapas da partida do forno Detroit: (A) forno desligado, (B) partida do forno e (C) forno ligado.

O refratário do forno Detroit é o composto por: MgO (82 - 88%), SiO₂ (3 - 5%) e Fe₂O₃ (3 - 6%), elementos que não atacam o material a ser produzido. Tal refratário suporta uma temperatura máxima de trabalho de cerca de 1800°C (IBAR, 2007).

4.3.2. ENSAIOS DE FUSÃO DOS MATERIAIS

As misturas produzidas foram fundidas em um Forno Detroit (em escala de laboratório) fabricado pela Combustol. Para cada uma das seis misturas formadas (como descrito no tópico 4.2) foram adotadas três temperaturas de vazamento do material (1400, 1450 e 1500°C), produzindo um total de dezoito amostras. Tal medida visou uma maior aproximação dos valores praticados nas indústrias produtoras das lãs de vidro e de rocha, uma vez que a temperatura de vazamento pode variar dependendo da composição química da mistura ou da aplicação do produto final.

O procedimento para a realização dos ensaios de fusão constou de:

- ligar o forno;
- aguardar a estabilização do arco-elétrico (aproximadamente 10min);
- carregar o forno com a mistura, ligar o basculamento e deixá-lo em funcionamento por 50min;
- realizar o vazamento do material.

A Figura 4.7 mostra o forno Detroit em funcionamento durante os ensaios de fusão dos materiais.

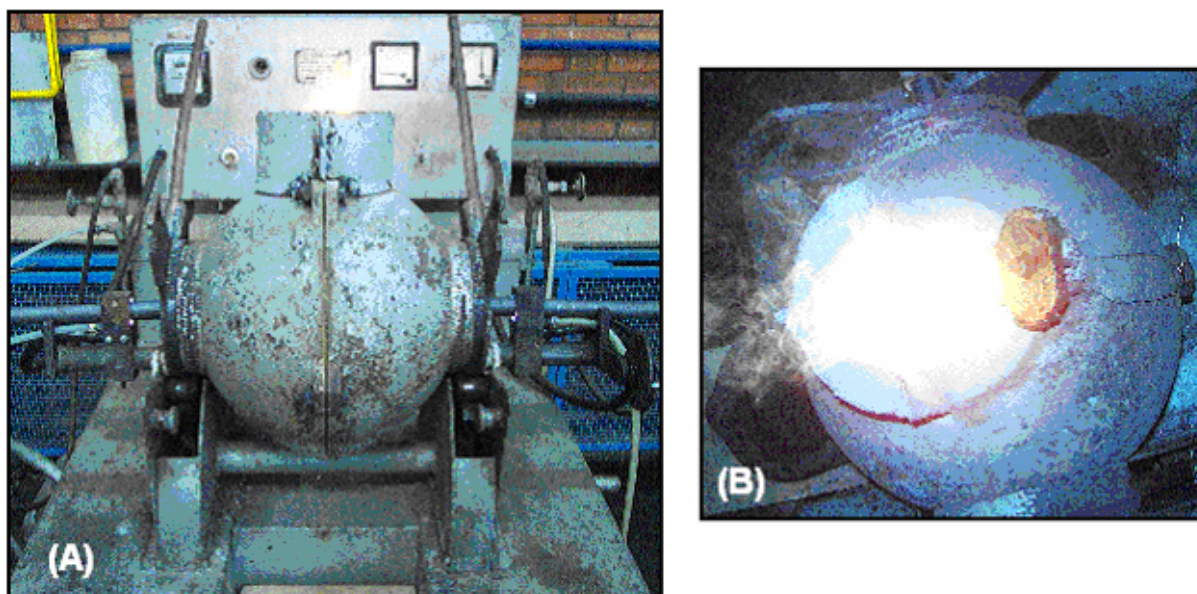


Figura 4.7 - Forno Detroit em funcionamento durante os ensaios de fusão: (A) visão frontal e (B) detalhe da saída do forno.

4.4. O RESFRIAMENTO RÁPIDO

Para a produção de qualquer tipo de material vítreo é indispensável o controle da taxa de resfriamento do material. As estruturas amorfas ou vítreas possuem desordem de longo alcance, suas estruturas atômicas não são regularmente dispostas em redes cristalinas. Portanto, a formação de um vidro não depende apenas do material, mas também da taxa de resfriamento (CHAUDHARI, 1980).

A temperatura de transição vítrea (T_g), é uma temperatura característica para os vidros, ela define a passagem do estado vítreo para o estado viscoelástico, através da chamada relaxação estrutural. Entretanto, a T_g não é um ponto de temperatura fixa, mas sim uma faixa, podendo assumir diversos valores de acordo com a velocidade de resfriamento do material. Uma explicação prática deste fenômeno pode ser observada na Figura 4.8. Nesta figura tem-se o ponto "A" representando a temperatura do material fundido. Ao passar pelo ponto "B", inicia-se o rearranjo dos átomos, sendo que, quando o resfriamento ocorre de uma maneira suficientemente rápida, não há tempo suficiente para a formação dos cristais (AKERMAN, 2000).

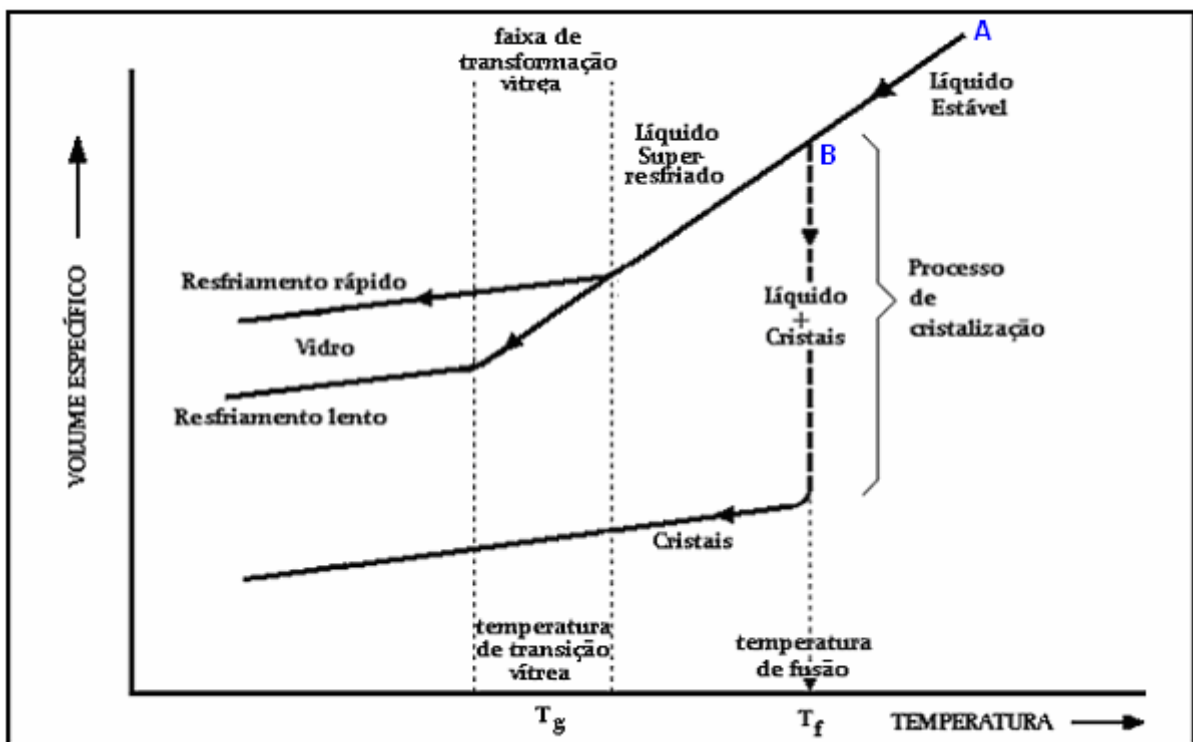


Figura 4.8 - Gráfico da variação do volume específico em função da temperatura (AKERMAN, 2000).

As lãs de vidro e de rocha são materiais predominantemente amorfos, portanto um resfriamento rápido é necessário. Neste trabalho o material fundido, foi vertido diretamente do forno em um recipiente contendo água à temperatura ambiente. Tal fato causou um choque térmico que resfriou bruscamente o material.

Neste procedimento procurou-se depositar o mínimo de material possível no recipiente, fazendo com isso uma tentativa de aproximação da técnica *Melt Spinning*, utilizada na produção das lãs.

Após o processo de resfriamento, o material foi coletado e levado a uma estufa do tipo FANEM a uma temperatura de 90°C durante 24h. Tal procedimento objetivou a secagem da água que entrou em contato com o material no recipiente de resfriamento.

A Figura 4.9 exibe o processo de resfriamento adotado. Nesta pode-se observar dois operadores do forno que realizam o vazamento do material sobre um recipiente contendo água (a temperatura ambiente), enquanto um terceiro registra a temperatura na qual o material se encontra. O aparelho utilizado para medir a temperatura do material foi o pirômetro óptico do tipo Minolta/Land (emissividade ajustada para 0,45).



Figura 4.9 - Processo de resfriamento em água do material.

4.5. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS FORMADOS

Os materiais formados após os ensaios de fusão foram caracterizados através de análises químicas, difratométricas e microestruturais.

Para as análises químicas e microestruturais foram caracterizadas apenas uma amostra de cada mistura obtida, uma vez que a ligeira variação da temperatura (entre 1400, 1450°C e 1500°C) não influi significativamente na composição química do material formado. As amostras selecionadas foram as que tiveram vazamento à temperatura de 1450°C. Portanto, seis amostras foram selecionadas para cada uma destas análises.

4.5.1. ANÁLISE QUÍMICA

Amostras de seis produtos (um de cada mistura) foram caracterizadas quimicamente no Laboratório de Química Analítica da empresa CELQA - Análises Técnicas Ltda.

Para esta caracterização 2 gramas de cada amostra foram coletados. As técnicas empregadas consistiram em:

- gravimetria / fluorização para a determinação do teor de silício;
- calorimetria para a determinação do teor de boro (foi utilizado um Espectrômetro Micronal B-380);
- fotometria de chama para a determinação dos teores de sódio e potássio (foi utilizado um Fotômetro Micronal B-262);
- aquecimento em estufa para a determinação da umidade (temperatura utilizada: 105°C);
- espectrofotometria de absorção atômica para a determinação dos teores dos outros elementos (foi utilizado um Espectro Perkin Elmer 2380).

4.5.2. ANÁLISE DIFRATOMÉTRICA

A Difratometria de raios-X é uma das mais importantes técnicas de caracterização dos materiais. Esta técnica foi empregada no trabalho com o objetivo de verificar o estado amorfo dos vidros desenvolvidos, sendo realizadas análises das 18 amostras fabricadas. Para efeito comparativo também foi realizada a análise de uma lâ de vidro comercializada atualmente.

A preparação das amostras foi iniciada com a pulverização destas em um Pulverizador Fritsch, durante 10min no nível de intensidade 7 do equipamento. Em seguida, as amostras em pó, com granulometria inferior a 45 μm , foram compactadas em um porta-amostra para a leitura da superfície inversa à de compactação, de modo a minimizar efeitos de orientação preferencial.

O equipamento utilizado foi um difratômetro Philips (mostrado na Figura 4.10), modelo MPD 1880, com radiação cobre $K\alpha$ ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), 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° .



Figura 4.10 - Difratômetro de raios-X utilizado (PMI, 2008).

As amostras foram submetidas a um feixe de raios monocromático. Durante este procedimento, cada partícula do pó se comporta como um pequeno cristal, com orientação aleatória em relação ao feixe de raios incidentes. A identificação das substâncias cristalinas é obtida através da comparação do difratograma com padrões difratométricos de fases individuais disponibilizados pelo *International Center for Diffraction Data* (GOBBO, 2003).

Através da análise dos difratogramas pode-se identificar se o material é amorfo ou cristalino. Para um material cristalino o difratograma fornece picos estreitos, como pode ser observado na Figura 4.11-A. Por sua vez, um material amorfo possui em seu difratograma uma curva larga, como pode ser observado na Figura 4.11-B.

O objetivo deste trabalho foi a obtenção das lãs de vidro e de rocha, dois materiais predominantemente amorfos. Portanto, os materiais formados devem obedecer ao difratograma esboçado pela Figura 4.11-B.

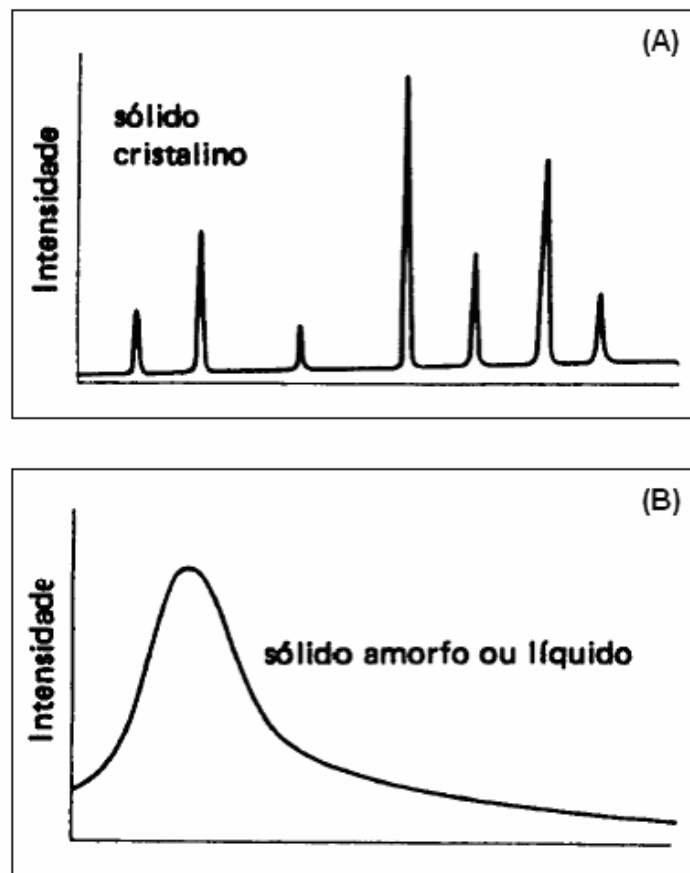


Figura 4.11 - Difratogramas típicos de: (A) material policristalino e (B) líquido ou sólido amorfo (PADILHA, 2000).

4.5.3. ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A análise microestrutural foi realizada no Laboratório de Microscopia Eletrônica e de Força Atômica (LabMicro) do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Os minerais não condutores de corrente elétrica, para serem analisados no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), devem ser previamente metalizados. A metalização consiste na precipitação, a vácuo, de uma película micrométrica de material condutor sobre a superfície do mineral, possibilitando a condução da corrente elétrica (CALLISTER, 2003).

Os materiais analisados neste trabalho não são condutores elétricos, por tal motivo, foi utilizado o aparelho *Sputter Coater* da Balzers, modelo SCD 050, para o recobrimento com ouro das amostras.

O equipamento utilizado para as análises foi o Microscópio Eletrônico de Varredura da marca Philips, modelo XL-30, equipado com uma microsonda EDAX para análise espectrométrica de raios-X e câmera EBSD para difração de elétrons retro-espalhados.

Foi realizado o mapeamento da composição química por EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) nas amostras que registraram fases secundárias durante a análise microestrutural.

4.6. CÁLCULOS DOS DADOS TERMODINÂMICOS

Uma fonte de comparação entre os dados obtidos experimentalmente e os cálculos teóricos pode ser obtida através dos diagramas de fases. A curva de resfriamento é um dado importante quando tratamos de materiais vítreos, uma vez que a condição de resfriamento influencia diretamente na estrutura do material formado.

Neste trabalho foi utilizado o software *ThermoCalc* (versão "n") para os cálculos dos dados termodinâmicos e obtenção dos gráficos de resfriamento.

O *ThermoCalc* é um software de cálculos termodinâmicos que através de sub-rotinas baseadas no método dos mínimos quadrados realiza a minimização das funções e parâmetros de energia livre de Gibbs das fases e componentes de um sistema de qualquer ordem, sendo este sistema em equilíbrio ou não (FARINA, 2004).

O procedimento para a obtenção dos resultados da simulação consiste em inserir as porcentagens de cada elemento na tela do *ThermoCalc*, o software processa estes dados e fornece um gráfico onde são mostradas as transições de fases, bem como as temperaturas em que estas ocorrem.

Foram elaboradas as curvas de resfriamento com base em uma composição média das lãs de rocha (valores mostrados na Tabela III.11) e de vidro (valores mostrados na Tabela III.12) obtidas na literatura.

Posteriormente, também foram elaboradas as curvas de resfriamento dos produtos obtidos através das seis misturas fabricadas, visando uma futura comparação entre as curvas destes produtos e as curvas das lãs de rocha e de vidro.

4.7. ENSAIOS DE VISCOSIDADE HERTY

Viscosidade é a resistência interna de um fluido (líquido ou gás) à alteração de sua forma, ou aos movimentos internos de suas moléculas umas em relação às outras. A viscosidade de um fluido denota sua resistência ao escoamento. O inverso da viscosidade é a fluidez, ou seja, a facilidade de escoamento (HARA et al., 1997).

Apesar do nome, na verdade, o Viscosímetro Herty mede a fluidez do material. Esta técnica consiste no vazamento do material fundido em um aparelho constituído de uma entrada no formato de um cone e um canal horizontal. Um desenho esquemático deste viscosímetro, em escala de laboratório, pode ser observado na Figura 4.12.

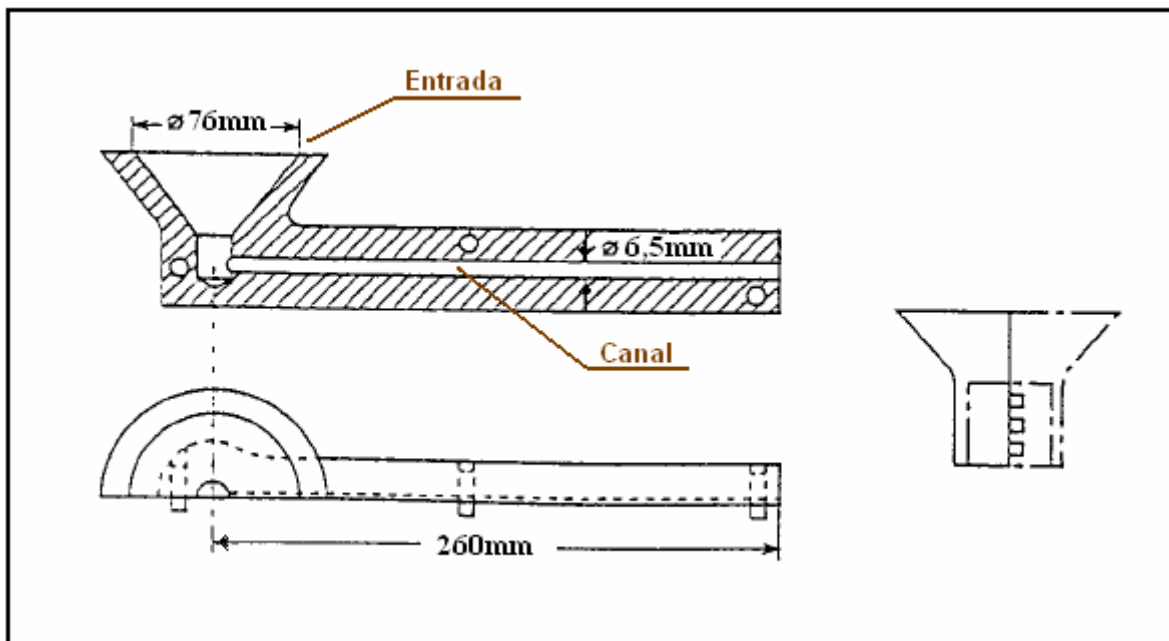


Figura 4.12 - Desenho esquemático de um Viscosímetro Herty em escala de laboratório (KEENE, 1995).

Cerca de 250g do material fundido é vazado sobre o cone de entrada do Viscosímetro Herty (processo demonstrado na Figura 4.13), o material então flui pelo canal, até que ocorra sua solidificação. Durante este processo a temperatura é registrada com a utilização de um pirômetro ótico do tipo Minolta/Land (emissividade ajustada para 0,45).



Figura 4.13 - Vazamento do material fundido no Viscosímetro Herty.

Após o resfriamento do material despejado no viscosímetro (Figura 4.14), é utilizado uma haste metálica graduada (escala em centímetros) para medir o espaçamento entre o início do canal do viscosímetro e o ponto final até o qual o material fluiu.

Este procedimento fornece a fluidez do material com precisão em centímetros. Para cada uma das seis misturas formadas (como descrito no tópico 4.2) foram adotadas três temperaturas de vazamento do material (1400, 1450 e 1500°C), produzindo um total de dezoito medidas.



Figura 4.14 - Viscosímetro Herty após o resfriamento do material.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão abordados os resultados obtidos na realização deste trabalho. Primeiramente serão apresentados os dados obtidos com a caracterização do resíduo do corte de granito e da escória de aciaria, bem como, os resultados dos cálculos termodinâmicos realizados. Em seguida, serão expostos os resultados das caracterizações físicas, químicas, difratométricas e microestruturais dos materiais formados. Por fim, este capítulo traz um tópico sobre os valores das viscosidades Herty (fluidez) encontrados.

5.1. ANÁLISES QUÍMICAS DO RESÍDUO DO CORTE DE GRANITO E DA ESCÓRIA DE ACIARIA

A Tabela V.1 traz o resultado da análise química da amostra do resíduo do corte de granito. Os valores estão expressos em porcentagem de peso. Observando esta tabela, pode-se notar que este é um material rico em sílica (66,32% de SiO_2), portanto a sua utilização como matéria-prima para a produção de materiais vítreos é justificável.

Tabela V.1 - Composição química do resíduo do corte de granito, em porcentagem de peso.

Elementos	Composições (% peso)
SiO_2	66,32
Al_2O_3	19,27
CaO	4,48
Fe_2O_3	2,29
MgO	1,58
Na_2O	1,28
B_2O_3	0,80
K_2O	0,55
TiO_2	0,26
MnO	0,04
Outros	0,34
Umidade	0,27
Perda ao fogo	2,48

A Tabela V.2 traz o resultado da análise química da amostra de escória de aciaria elétrica, sendo que, os valores estão expressos em porcentagem de peso.

Observando esta tabela, pode-se notar que o material possui aproximadamente 17% de SiO₂ em sua composição, portanto, para a sua utilização como matéria-prima para a produção de materiais vítreos, é necessária a adição de outros componentes para compensar este valor. Entretanto, este material possui porcentagens de outros elementos presentes nas composições das lãs de vidro e de rocha, como por exemplo, o MgO e a alumina (Al₂O₃).

Tabela V.2 - Composição química da escória de aciaria elétrica, em porcentagem de peso.

Elementos	Composições (% peso)
CaO	46,93
SiO ₂	16,85
Fe ₂ O ₃	16,21
MnO	5,47
Al ₂ O ₃	5,44
MgO	2,56
Cr ₂ O ₃	2,12
Outros	4,42

Devido ao grande volume produzido, apesar de todas as aplicações já existentes para o consumo dos resíduos gerados pela indústria de beneficiamento do granito, ainda existe mercado para novos produtos que se utilizem deste. Como o resíduo de granito possui alto teor de sílica, uma nova rota para o seu aproveitamento pode ser a sua adição à escória de aciaria, visando corrigir a relação CaO/SiO₂ desta, para os mesmos encontrados na escória de alto-forno. Tal procedimento possibilita o reaproveitamento destes dois resíduos de uma forma que não se tenha nenhuma restrição técnica ou ambiental.

5.2. CÁLCULOS TERMODINÂMICOS TEÓRICOS

Este tópico traz os resultados das simulações realizadas através do software *ThermoCalc*. São apresentadas as curvas de resfriamento das lãs de rocha e de vidro e dos produtos das diferentes misturas obtidas, ou seja, a variação da composição do material (em porcentagem de peso) em função da temperatura (em grau Celsius).

As Figuras 5.1 e 5.2 mostram as curvas de resfriamento com base em composições aproximadas das lãs de rocha (valores mostrados na Tabela III.11) e de vidro (valores mostrados na Tabela III.12) obtidas na literatura.

Pode-se observar que as fases sólidas formadas inicialmente são iguais para as duas lãs. O espinélio ($MgO \cdot Al_2O_3$) é formado, aproximadamente, a $1220^\circ C$ na lã de rocha e a $1300^\circ C$ na lã de vidro. O silicato de cálcio ($CaO \cdot SiO_2$), segunda fase apresentada, é formado, aproximadamente, a $1210^\circ C$ na lã de rocha e a $1220^\circ C$ na lã de vidro.

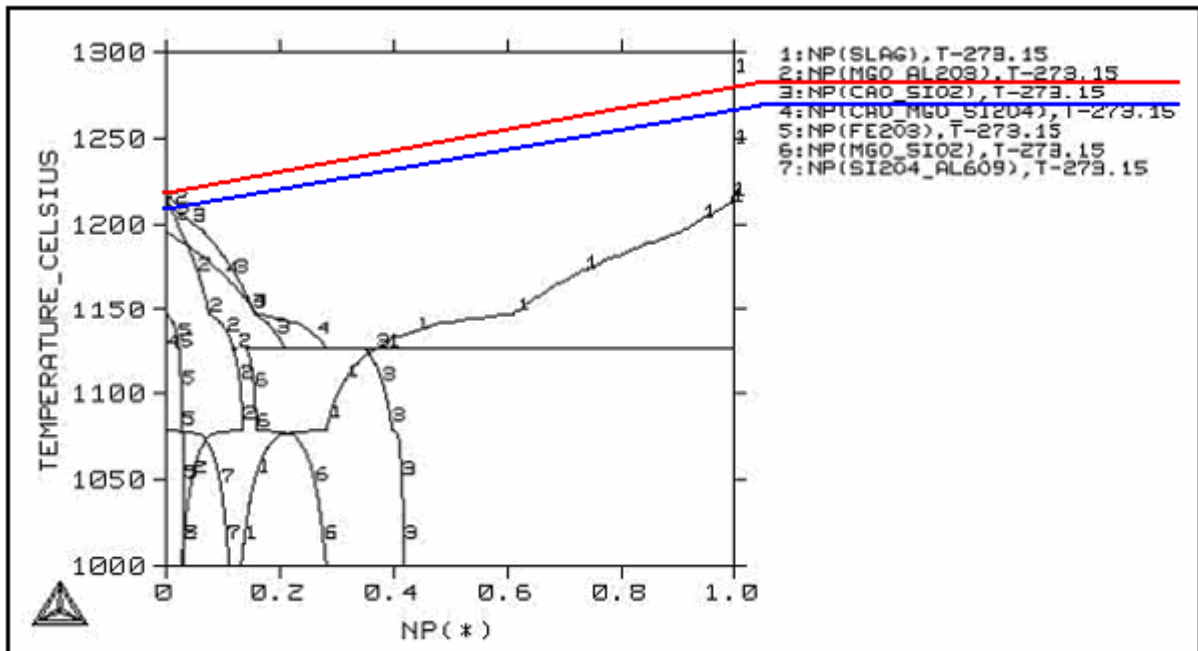


Figura 5.1 - Curva de resfriamento da lã de rocha: variação da composição do material (em porcentagem de peso) em função da temperatura (em grau Celsius).

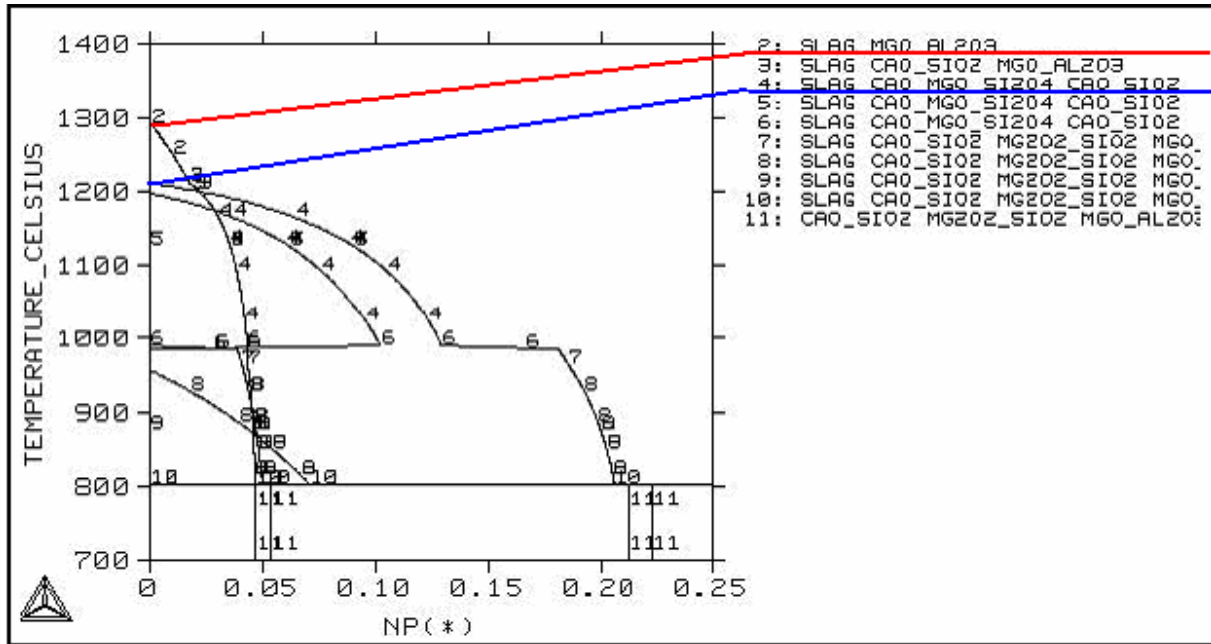


Figura 5.2 - Curva de resfriamento da lã de vidro: variação da composição do material (em porcentagem de peso) em função da temperatura (em grau Celsius).

Nas Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 estão representadas as curvas de resfriamento dos materiais obtidos visando a produção de lã de rocha.

A curva obtida através do produto da mistura “A” (resíduo de granito como matéria-prima principal) mostra a formação do espinélio a uma temperatura de aproximadamente 1220°C. O silicato de cálcio é formado a aproximadamente 1180°C (pode-se observar estes valores na Figura 5.3). Portanto, as primeiras fases sólidas formadas para este produto são as mesmas que a da lã de rocha.

A Figura 5.4 mostra a curva de resfriamento do produto da mistura “C”, que possui a escória de aciaria como componente principal. Nesta, verifica-se a formação do silicato de cálcio a cerca de 1280°C, sendo o espinélio formado a, aproximadamente, 1220°C.

Através da simulação utilizando o produto obtido com a mistura contendo os dois resíduos associados (mistura “E”) obteve-se a curva mostrada pela Figura 5.5. Nesta, observou-se a formação do espinélio a cerca de 1190°C, sendo o silicato de cálcio formado a, aproximadamente, 1160°C.

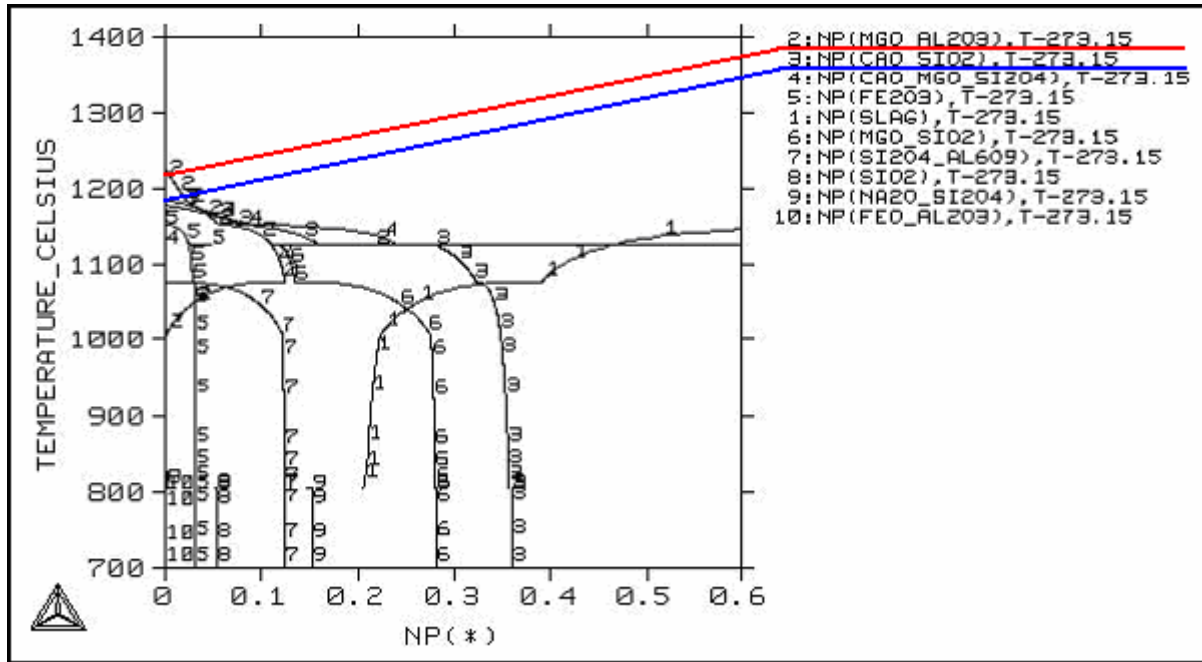


Figura 5.3 - Curva de resfriamento da composição obtida com a mistura "A": variação da composição do material (em porcentagem de peso) em função da temperatura (em grau Celsius).

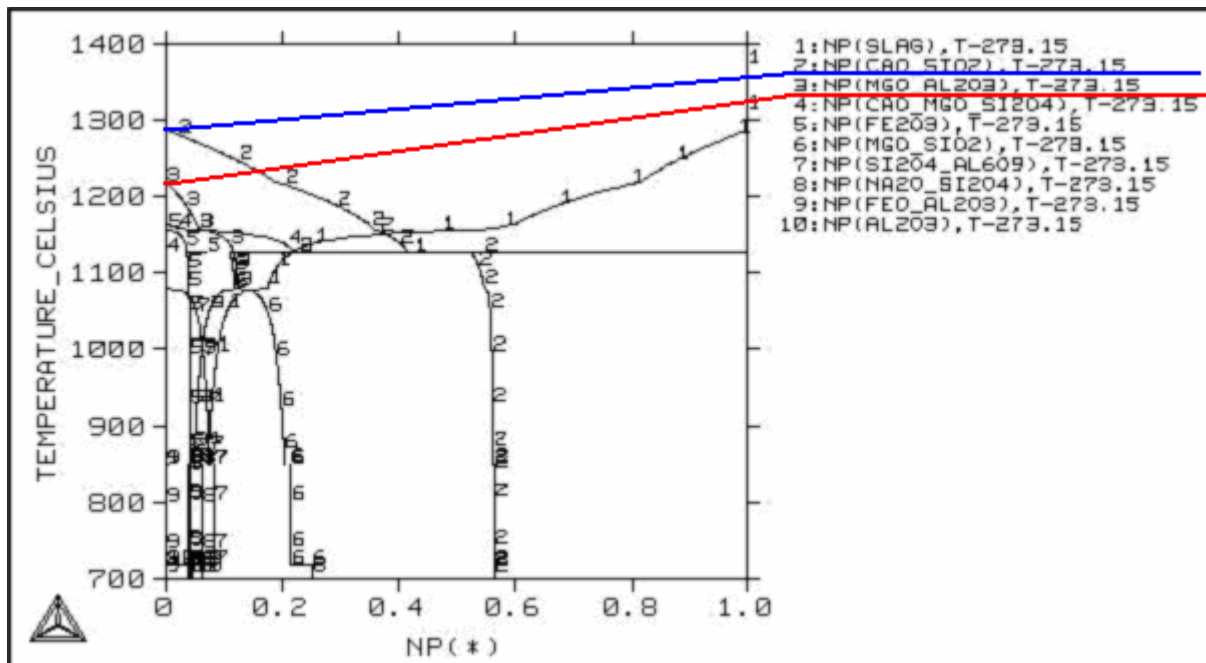


Figura 5.4 - Curva de resfriamento da composição obtida com a mistura "C": variação da composição do material (em porcentagem de peso) em função da temperatura (em grau Celsius).

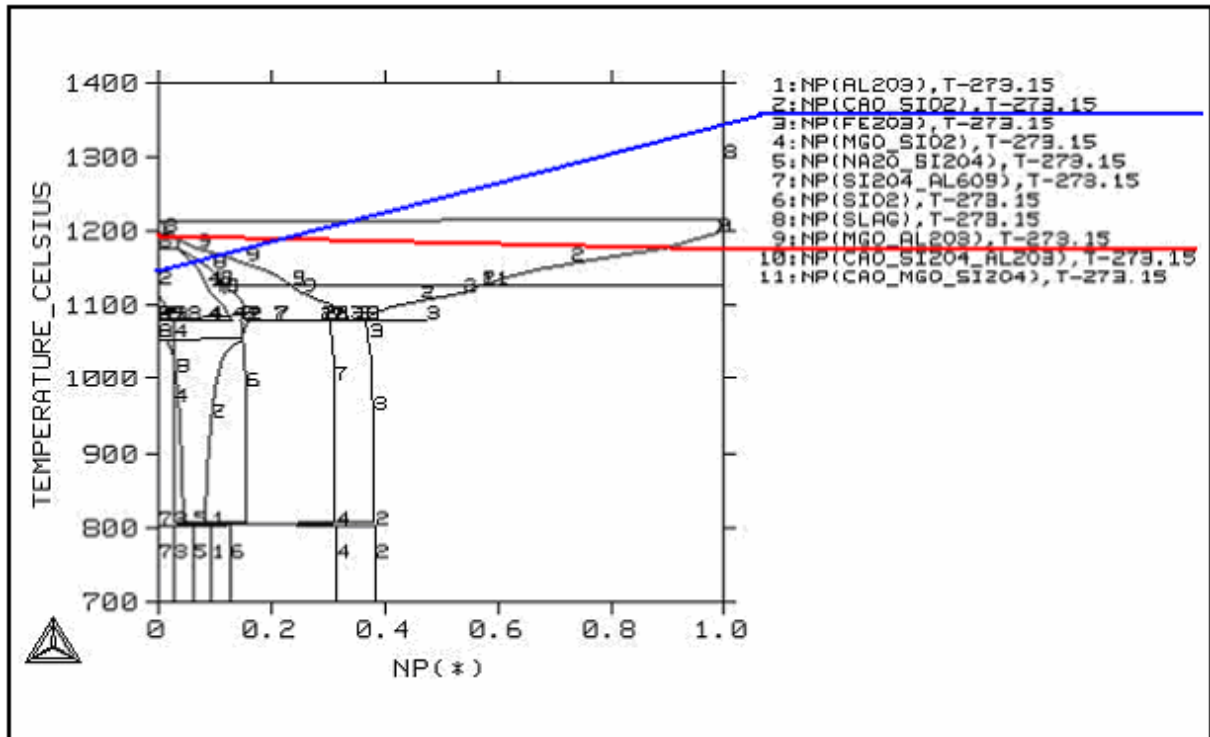


Figura 5.5 - Curva de resfriamento da composição obtida com a mistura “E”: variação da composição do material (em porcentagem de peso) em função da temperatura (em grau Celsius).

Na Figura 5.6 pode ser observada a curva de resfriamento da mistura “B”. Esta visou a obtenção de lã de vidro, utilizando como matéria-prima principal uma associação do resíduo de granito com a escória de aciaria. Pode-se observar que as fases formadas inicialmente são o espinélio ($MgO \cdot Al_2O_3$) a aproximadamente $1380^\circ C$ e o silicato de cálcio ($CaO \cdot SiO_2$) a aproximadamente $1280^\circ C$. Para este produto, as fases formadas inicialmente foram as mesmas para a lã de vidro, com uma diferença nas temperaturas de formação.

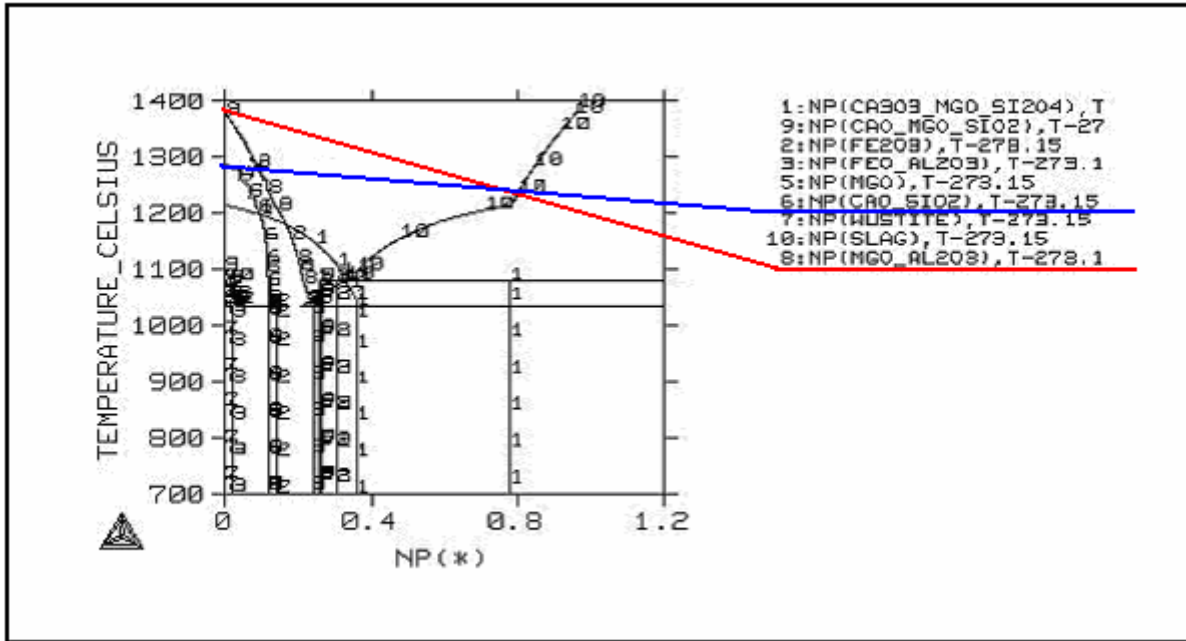


Figura 5.6 - Curva de resfriamento da composição obtida com a mistura “B”: variação da composição do material (em porcentagem de peso) em função da temperatura (em grau Celsius).

Devido a uma restrição do *ThermoCalc*, as curvas de resfriamento das misturas “D” (uso da escória de aciaria visando a produção de lâ de vidro) e “F” (uso da escória de aciaria e do resíduo de granito visando a produção de lâ de vidro) desenvolveram formas adversas ao estudo. Tal fato se deve a dificuldade do software em interpretar algumas composições. Estas simulações foram repetidas, entretanto também não houve sucesso nas novas tentativas.

5.3. ASPECTOS FÍSICOS DOS MATERIAIS FORMADOS

Os materiais formados tiveram aspectos físicos semelhantes para todas as composições formuladas.

Como era esperado, os materiais adquiriram propriedades semelhantes aos vidros: translúcidos, frágeis e quebradiços à temperatura ambiente. Quanto a coloração, os materiais apresentaram a cor verde, variando de uma tonalidade clara, até uma mais escura.

Uma das características mais interessantes dos materiais vítreos é a cor. Segundo GUPTA (1996), o vidro sem “contaminantes” é incolor. Para que ele apresente certa coloração, determinados óxidos ou elementos metálicos são acrescentados à sua composição. Estes óxidos ficam dissolvidos na massa, interferindo com a luz e produzindo as cores. Pequenas adições de íons de cobalto, cromo, cobre, manganês ou ferro causam grandes mudanças na coloração.

O óxido de cromo III (Cr_2O_3) é o principal agente corante dos vidros verdes. Quando o cromo se encontra no estado reduzido, ele fornece uma tonalidade fortemente esverdeada ao vidro. Outro óxido que fornece a cor verde aos vidros é o Fe_2O_3 , que é utilizado na coloração de vidros planos para carros (AKERMAN, 2000).

Pode-se concluir que a cor verde obtida nos materiais produzidos neste trabalho possui origem nos teores de Cr_2O_3 e Fe_2O_3 encontrados nas matérias-primas empregadas. A escória de aciaria possui 2,12% de Cr_2O_3 e 16,21% de Fe_2O_3 , enquanto o resíduo de granito possui 2,29% de Fe_2O_3 e não possui Cr_2O_3 .

Observando as composições das lâs de vidro e de rocha (mostradas nas Tabelas III.11 e III.12) nota-se que o Cr_2O_3 não faz parte destas. Entretanto, o aparecimento deste óxido na composição dos produtos finais não é uma restrição ao emprego destes como lâ de vidro ou de rocha, pois, como mencionado anteriormente, o Cr_2O_3 é utilizado pelas indústrias vidreiras para a coloração do vidro. Portanto, a adição do óxido de cromo não interfere nas propriedades isolantes das lâs.

Quanto a coloração verde dos materiais formados, esta também não implica em restrições ao produto, uma vez que, para o uso comercial as lãs são recobertas por um material aglutinante, adquirindo a coloração deste.

A Figura 5.7 exibe uma foto de um dos materiais formados (mistura com escória de aciaria e aditivos com o objetivo de produzir lã de rocha). Nesta figura podemos observar a coloração verde do material.



Figura 5.7 - Amostra do material formado através da mistura da escória de aciaria com aditivos, visando a produção de lã de rocha.

5.4. ANÁLISES QUÍMICAS DOS MATERIAIS FORMADOS

Este tópico apresenta as composições químicas das amostras dos diferentes materiais formados. Para todas as análises foram selecionados os produtos obtidos com o vazamento do material fundido a 1450°C, como descrito na metodologia deste trabalho.

A Tabela V.3 traz os resultados das análises químicas dos produtos formados a partir do resíduo de granito como matéria-prima principal. As composições químicas das misturas “A” (visando a produção de lã de rocha) e “B” (visando a produção de lã de vidro) possui as proporções dos elementos majoritários dentro da faixa de composição da lãs (conforme valores citados nas Tabelas III.11 e III.12). Uma exceção é o traço do elemento B_2O_3 (0,26%) encontrado (na mistura “A”), este não faz parte da composição da lã de rocha, porém devido à baixa concentração deste, não existe perda de propriedades por parte da lã. Uma discussão deve ser feita a respeito do teor de alumina (Al_2O_3) presente nos dois produtos.

Segundo as composições citadas na literatura (Tabela III.12), o teor de alumina presente na mistura “A” (14,20%) está de acordo com a faixa citada por JURY (1997), definida entre 14 e 15%, entretanto para BUCK (1997) que estabelece esta faixa de 8 a 13,5%, e para LUOTO et al. (1998), que cita um teor de 11,9%, a porcentagem de alumina excede os valores recomendados para a lã de rocha.

Para a lã de vidro, a literatura (Tabela III.11) cita valores de 2,9% (LUOTO et al., 1998), 1,0 a 3,0% (BRAGA, 1991) e 3,0 a 14,5% (BUCK, 1997), assim, o valor encontrado na mistura “B” (6,20%) fica acima do estabelecido pelos dois primeiros autores citados.

A porcentagem de alumina apresentada possui origem no alto teor deste elemento presente no resíduo de granito (19,27%), este valor se aproxima dos praticados nas composições das fibras utilizadas como reforço (aproximadamente 15,0% de Al_2O_3). A alumina fornece durabilidade química, propriedade requerida para este tipo de fibra, entretanto, proporciona um aumento na viscosidade que dificulta a trabalhabilidade do vidro (ALVES, 2006).

Tabela V.3 - Composição química dos produtos formados a partir do resíduo de granito visando a produção de lã de rocha (mistura "A") e lã de vidro (mistura "B").

Elementos	Composições (% peso)	
	Mistura "A"	Mistura "B"
SiO ₂	47,66	63,10
CaO	17,60	7,40
MgO	9,40	3,50
Al ₂ O ₃	14,20	6,20
MnO	0,08	0,04
Fe ₂ O ₃	7,57	0,86
Na ₂ O	1,89	14,10
K ₂ O	0,94	0,85
TiO ₂	0,35	0,13
B ₂ O ₃	0,26	3,64
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00
Outros	0,05	0,18

As composições químicas dos produtos formados a partir escória de aciaria como matéria-prima principal estão mostradas na Tabela V.4. Para o produto da mistura "C" (que visou a produção de lã de rocha) as proporções dos elementos se encontram dentro da faixa de composição da lã de rocha (Tabela III.12). Traços dos elementos B₂O₃ (0,62%) e Cr₂O₃ (0,68%) foram encontrados, entretanto, devido as baixas concentrações destes óxidos, não existe perda de propriedades por parte da lã. Os valores dos elementos majoritários encontrados neste produto satisfazem as porcentagens da composição da lã de rocha, portanto a utilização da escória de aciaria como matéria-prima principal, para a produção desta lã, é recomendável.

A composição química da mistura "D" (que visou a produção de lã de vidro) possui desvios com relação a faixa de composição da lã de vidro (Tabela III.11). O teor de CaO da escória (46,93%) fez com que o produto final apresenta-se este elemento em excesso, o que poderia facilitar a devitrificação, entretanto este fenômeno não foi identificado, uma vez que a análise difratométrica não apresentou picos cristalinos deste material. Outro fator limitante para o uso da escória de aciaria para a produção de lã de vidro é o seu teor de Fe₂O₃ (16,21%), uma vez que esta lã apresenta porcentagens variando entre 0 e 2% deste composto. Portanto, a escória pode ser utilizada apenas como matéria-prima auxiliar (em torno de 10% do total da mistura).

Tabela V.4 - Composição química dos produtos formados a partir da escória de aciaria visando a produção de lã de rocha (mistura “C”) e lã de vidro (mistura “D”).

Elementos	Composições (% peso)	
	Mistura “C”	Mistura “D”
SiO ₂	43,20	55,19
CaO	22,60	17,20
MgO	7,80	1,42
Al ₂ O ₃	10,60	2,20
MnO	0,93	1,93
Fe ₂ O ₃	11,10	4,86
Na ₂ O	2,20	11,30
K ₂ O	0,18	0,62
TiO ₂	0,05	0,05
B ₂ O ₃	0,62	4,80
Cr ₂ O ₃	0,68	0,42
Outros	0,04	0,01

Segundo a Tabela V.5, a composição química da mistura “E” (resíduo do corte de granito e escória de aciaria como matérias-primas principais visando a produção de lã de rocha) possui os teores dos elementos majoritários dentro da faixa de composição da lã de rocha citada na literatura (Tabela III.12). Traços de B₂O₃ (0,15%) e Cr₂O₃ (0,42%) foram registrados, porém devido aos baixos teores destes, tal fato não desqualifica esta mistura para a produção da lã de rocha. Para a mistura citada, a associação do resíduo de granito e da escória de aciaria realizou uma combinação dos elementos químicos presentes nestes resíduos, e assim, esta mistura aproximou-se da composição da lã de rocha. Portanto, a mistura “E” possui emprego para a produção desta lã.

A mistura “F” (resíduo do corte de granito e escória de aciaria como matérias-primas principais visando a produção de lã de vidro) também teve a sua composição química exposta na Tabela V.5. O produto apresentou teores de SiO₂ (54,20%), CaO (11,60%), Al₂O₃ (9,10%) e Fe₂O₃ (3,86%) discrepantes dos citados para a lã de vidro, por BRAGA (1991) e LUOTO et al. (1998), porém encontra-se na faixa de composição citada por BUCK (1997). Um ajuste desta mistura deve ser feito através de aditivos químicos. A sílica deve ser aumentada, o que poderia ser feito aumentando a porcentagem do resíduo, mas isto aumentaria o teor de alumina.

Tabela V.5 - Composição química dos produtos formados a partir do resíduo de granito e da escória de aciaria visando a produção de lã de rocha (mistura “E”) e lã de vidro (mistura “F”).

Elementos	Composições (% peso)	
	Mistura “E”	Mistura “F”
SiO ₂	47,35	54,20
CaO	19,60	11,60
MgO	8,90	3,30
Al ₂ O ₃	11,50	9,10
MnO	0,71	0,34
Fe ₂ O ₃	7,57	3,86
Na ₂ O	2,42	9,80
K ₂ O	1,11	1,65
TiO ₂	0,25	0,35
B ₂ O ₃	0,15	5,62
Cr ₂ O ₃	0,42	0,18
Outros	0,02	0,02

5.5. DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DOS MATERIAIS FORMADOS

Os espectros de difração de raios-X das amostras dos diferentes produtos obtidos são apresentados neste tópico. Através da análise destes espectros verificou-se que os materiais apresentaram características estruturais derivadas de um processo de resfriamento suficientemente rápido a fim de garantir a máxima ausência de ordenação estrutural dos vidros.

Isto quer dizer que não houve o processo de devitrificação indesejado na obtenção destes materiais, pois os vidros não apresentaram picos cristalinos significativos em seus respectivos difratogramas. Uma ressalva deve ser feita aos materiais produzidos através das misturas “A” e “B”, nos difratogramas destes materiais foram observados pequenos picos cristalinos, entretanto, devido a baixa intensidade destes picos, estes materiais podem ser considerados predominantemente amorfos.

Os picos cristalinos da amostra elaborada com a mistura “A” podem ser observados nas Figuras 5.8, 5.9 e 5.10, e para a mistura “B” nas Figuras 5.11, 5.12 e 5.13. Realizando a comparação destes picos com o banco de dados, conclui-se que estes representam a fase do espinélio. O espinélio ($MgO \cdot Al_2O_3$) possui composição teórica correspondente a 28,3% de MgO e 71,7% de Al_2O_3 .

As misturas que apresentaram picos cristalinos (“A” e “B”) foram produzidas a partir do resíduo do corte de granito como matéria-prima principal. Este resíduo conta com uma alta concentração de Al_2O_3 em sua composição (19,27%) quando comparado às composições das lãs de vidro e de rocha.

Segundo MUSIKANT (1985), a alumina (Al_2O_3) aumenta a durabilidade química, diminui o coeficiente de expansão e aumenta a viscosidade dos materiais vítreos. A viscosidade é o inverso da fluidez, assim, como os materiais produzidos através do resíduo do granito possuem alta concentração de alumina (14,20% para a mistura “A” e 6,20% para a mistura “B”), eles apresentaram alta viscosidade e portanto baixa fluidez (como será demonstrado no tópico 5.7).

A baixa fluidez dificulta o vazamento do material fundido de dentro do forno. Como o resfriamento realizado neste trabalho foi feito de uma maneira manual (como foi mostrado pela Figura 4.9), os materiais que apresentaram uma menor fluidez tiveram uma amostra de maior área vazada sobre o recipiente com água.

Segundo HLAVÁČ (1983), peças com grandes dimensões resfriam muito lentamente. O aumento da área do material a ser resfriado, ocasiona em um aumento do tempo para que possa ocorrer a cristalização deste. Logo, quanto maior a área do material, maior será a possibilidade deste formar cristais durante o processo de resfriamento.

Cristalização é a combinação de dois processos: nucleação e crescimento. A etapa de nucleação tem lugar quando o sistema começa a se ordenar em alguns pontos, chamados núcleos. As duas etapas podem ocorrer simultaneamente, mas são distintas com relação à lei de velocidades que obedecem (CALLISTER, 2003).

Caso não sejam criados os núcleos, a cristalização não ocorre. Por sua vez, o impedimento do crescimento pode acarretar a existência de núcleos com tamanhos reduzidos, mas em termos práticos, o material ainda poderá ser considerado um vidro. Neste contexto, as velocidades de nucleação e crescimento, juntamente com a taxa de resfriamento, determinam se um vidro é ou não formado (CALLISTER, 2003).

Portanto, uma justificativa para os picos apresentados pelos difratogramas dos materiais produzidos através do resíduo do corte de granito como matéria-prima principal é que, devido a este material possuir uma alta concentração de alumina, seus produtos apresentaram baixa fluidez, o que gerou certa dificuldade no processo de resfriamento, fazendo com que amostras com dimensões maiores fossem coletadas.

Os picos apresentados representam o espinélio ($MgO \cdot Al_2O_3$), primeira fase a precipitar durante o resfriamento das lâs de rocha e de vidro, como foi mostrado pelas curvas de resfriamento (exibidas nas Figuras 5.1 e 5.2) geradas pelo software *ThermoCalc*. Sendo assim, pode-se concluir que devido a maior dimensão das amostras coletadas, ocorreu um maior tempo para a cristalização do material, possibilitando o aparecimento da primeira fase cristalina, o espinélio.

Durante o processamento industrial das lâs de vidro e de rocha é utilizada a técnica de *Melt Spinning* (descrita no tópico 3.4.1 deste trabalho). Segundo CHAUDHARI (1980), utilizando-se esta técnica, o material fundido, quando em contato com a superfície fria do disco, resfria a uma taxa de -10^6 °C/s, dando origem a uma fita com alguns milímetros de largura e aproximadamente 30 μm de espessura. É esta pequena espessura que possibilita a alta taxa de resfriamento mencionada, pois, devido à grande diferença entre a massa do disco e do material fundido, e também porque os metais apresentam grande condutividade térmica, o material resfria e solidifica extremamente rápido, em um tempo menor do que o necessário para a ordenação cristalina dos átomos. Portanto, pode ser possível que as lâs fabricadas a partir do resíduo do corte de granito não apresentem picos cristalinos, caso sejam submetidas ao mesmo tipo de processamento.

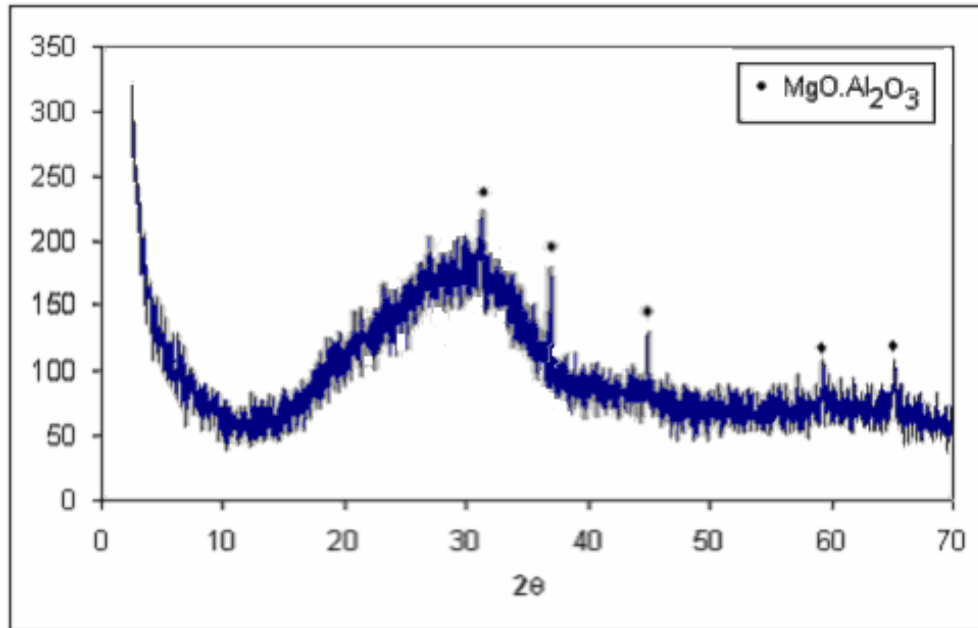


Figura 5.8 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura “A” (resíduo de granito visando a produção de lã de rocha), com vazamento do material fundido a 1400°C.

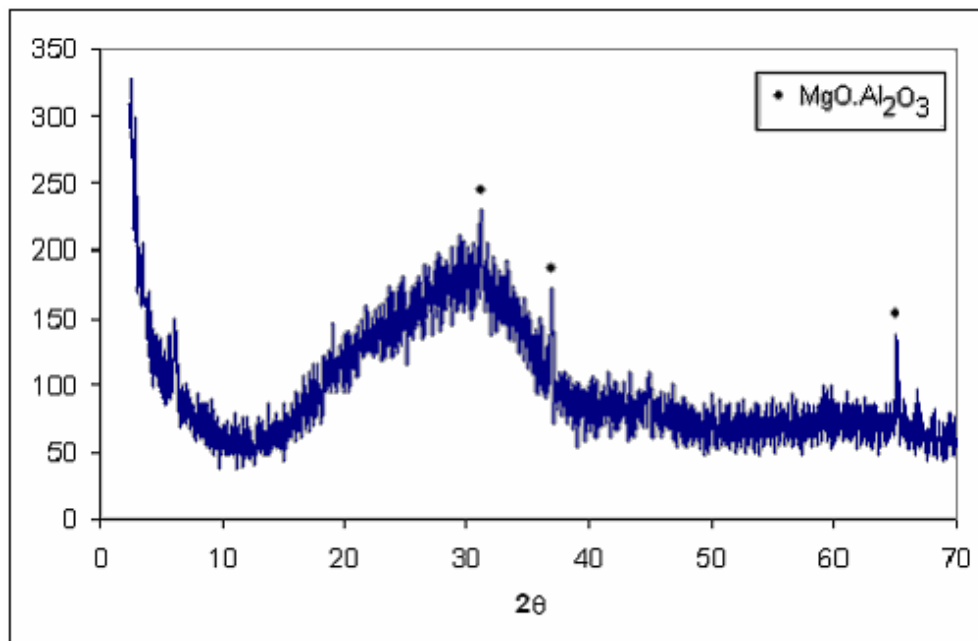


Figura 5.9 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura “A” (resíduo de granito visando a produção de lã de rocha), com vazamento do material fundido a 1450°C.

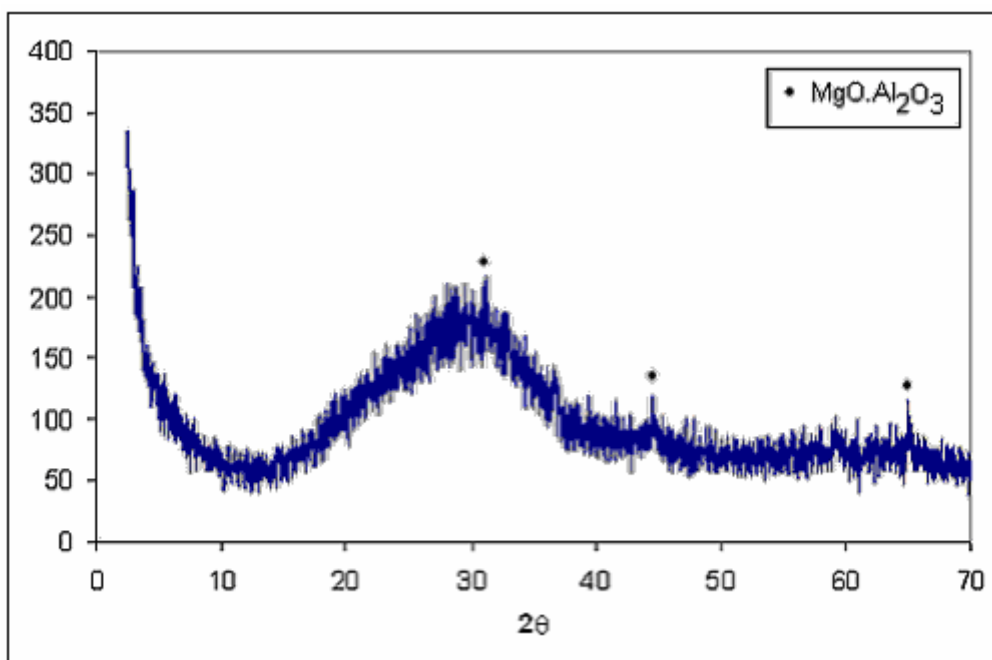


Figura 5.10 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura "A" (resíduo de granito visando a produção de lã de rocha), com vazamento do material fundido a 1500°C.

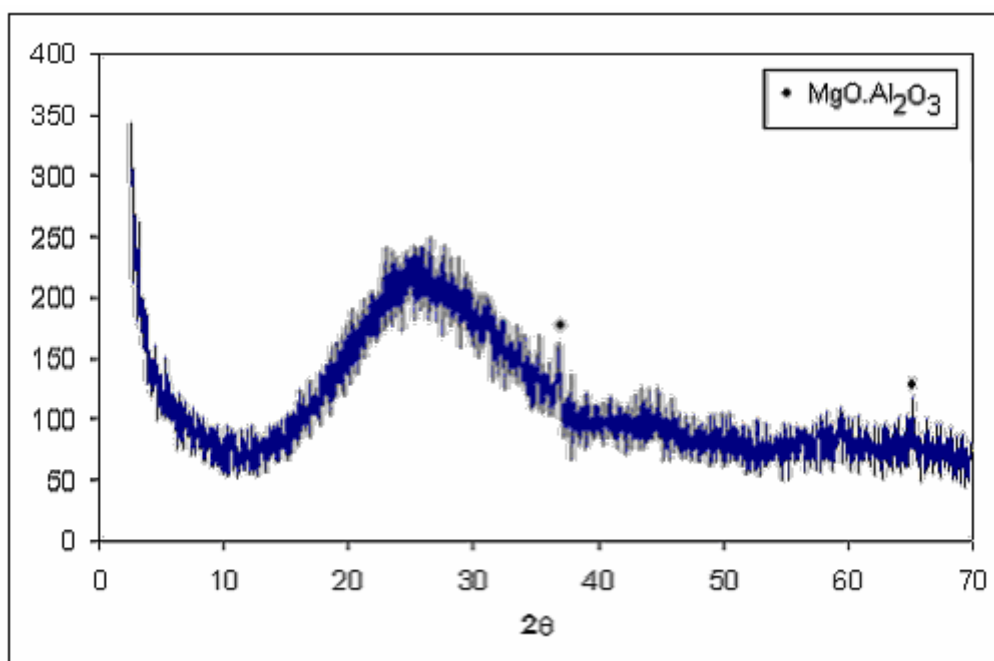


Figura 5.11 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura "B" (resíduo de granito visando a produção de lã de vidro), com vazamento do material fundido a 1400°C.

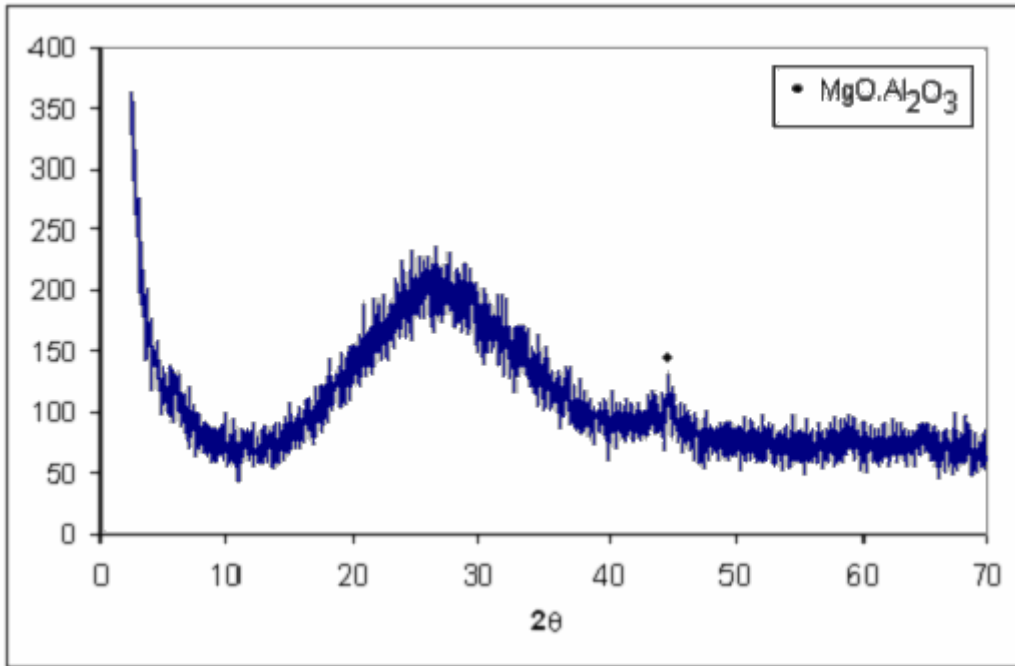


Figura 5.12 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura "B" (resíduo de granito visando a produção de lã de vidro), com vazamento do material fundido a 1450°C.

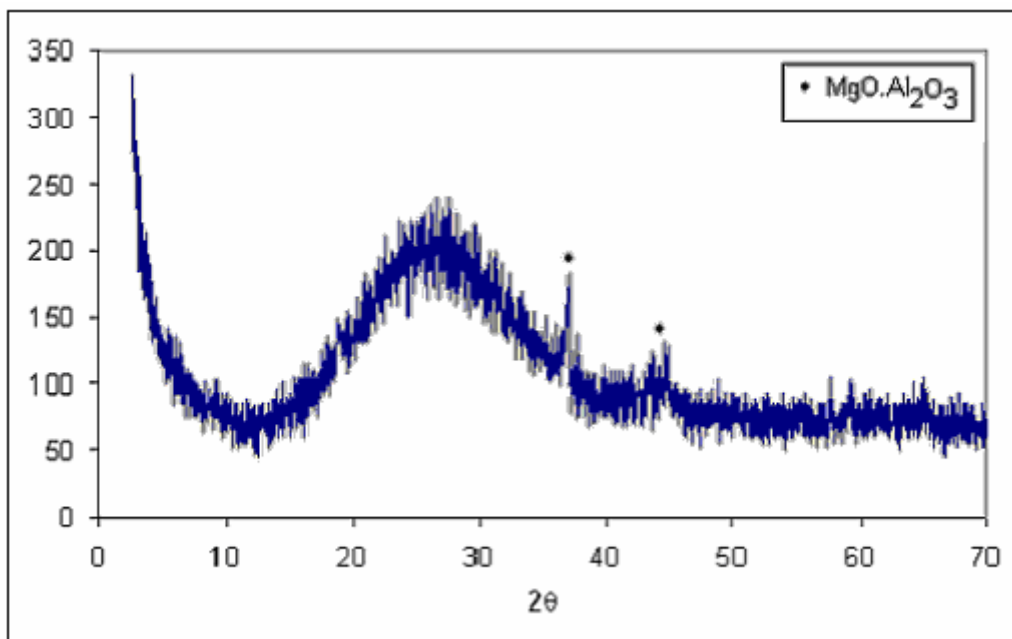


Figura 5.13 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura "B" (resíduo de granito visando a produção de lã de vidro), com vazamento do material fundido a 1500°C.

Os difratogramas de raios-X das amostras dos materiais formados com o uso da escória de aciaria como matéria-prima principal são mostrados nas Figuras 5.14, 5.15 e 5.16, para produtos que visaram a composição da lâ de rocha (mistura “C”) e nas Figuras 5.17, 5.18 e 5.19 para produtos que visaram a produção de lâ de vidro (mistura “D”).

Através da análise destas figuras pode-se notar que as curvas exibidas apresentaram picos largos, isto caracteriza que os materiais formados são amorfos. Não foram registrados picos cristalinos nestes materiais, demonstrando que o processo de resfriamento foi eficiente para a formação dos vidros.

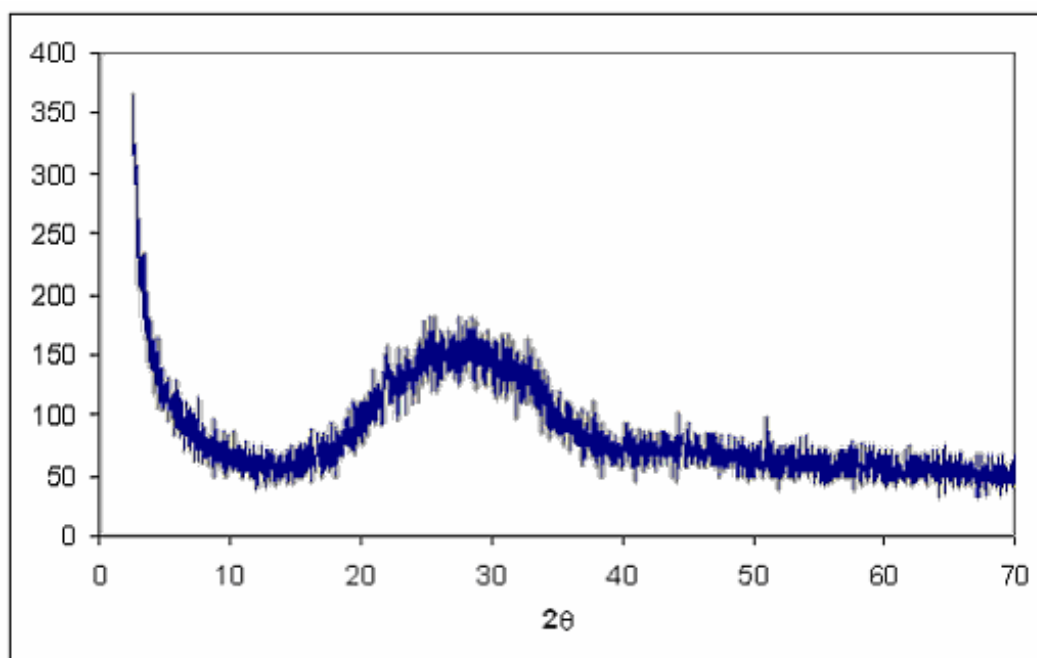


Figura 5.14 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura “C” (escória de aciaria visando a produção de lâ de rocha), com vazamento do material fundido a 1400°C.

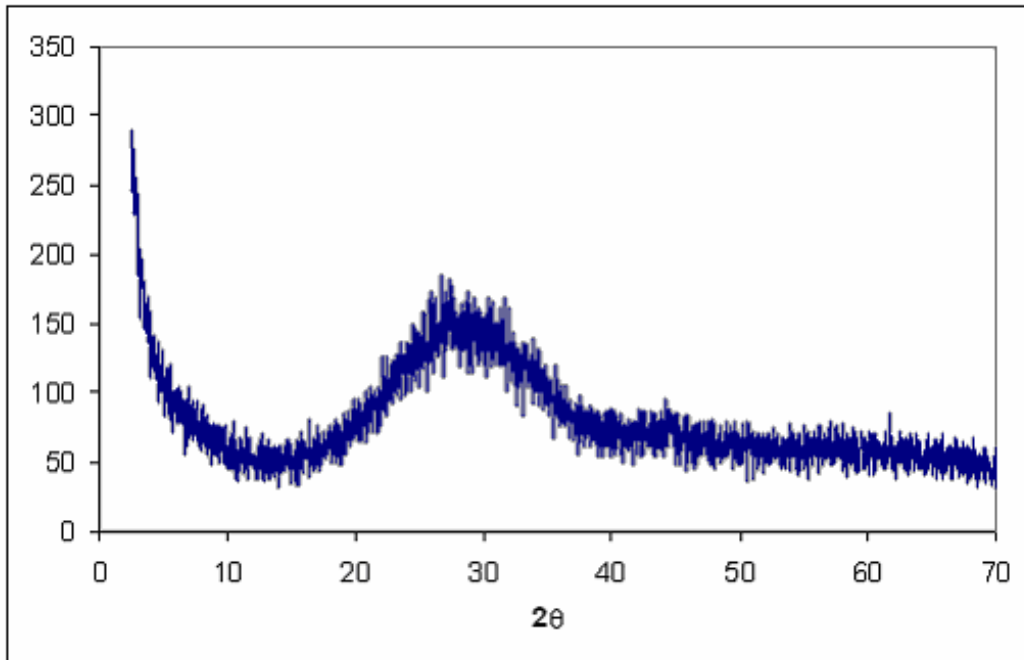


Figura 5.15 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura "C" (escória de aciaria visando a produção de lã de rocha), com vazamento do material fundido a 1450°C.

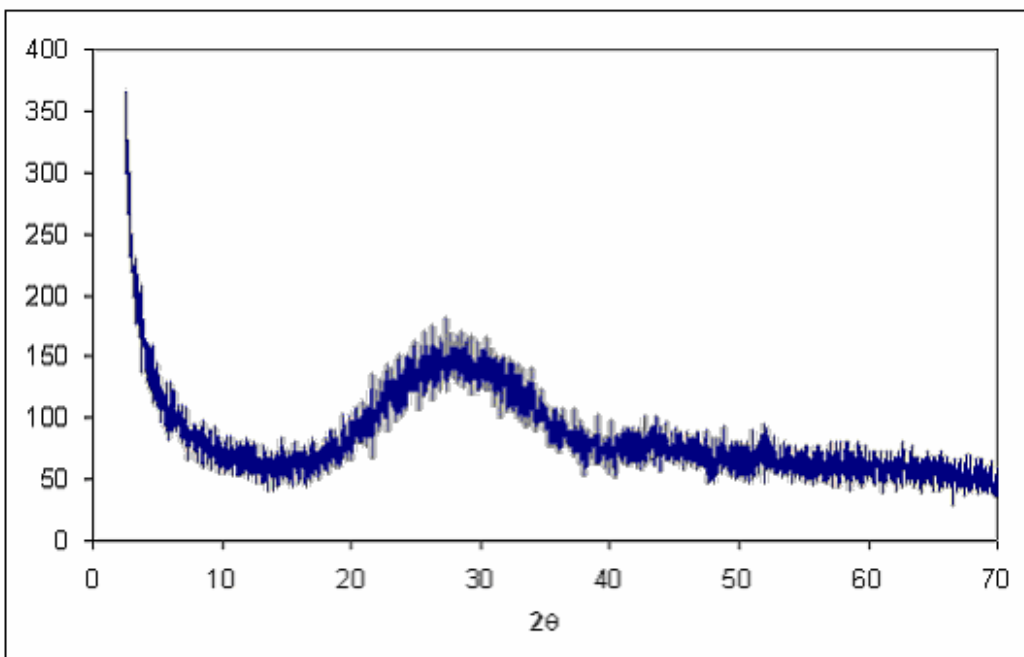


Figura 5.16 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura "C" (escória de aciaria visando a produção de lã de rocha), com vazamento do material fundido a 1500°C.

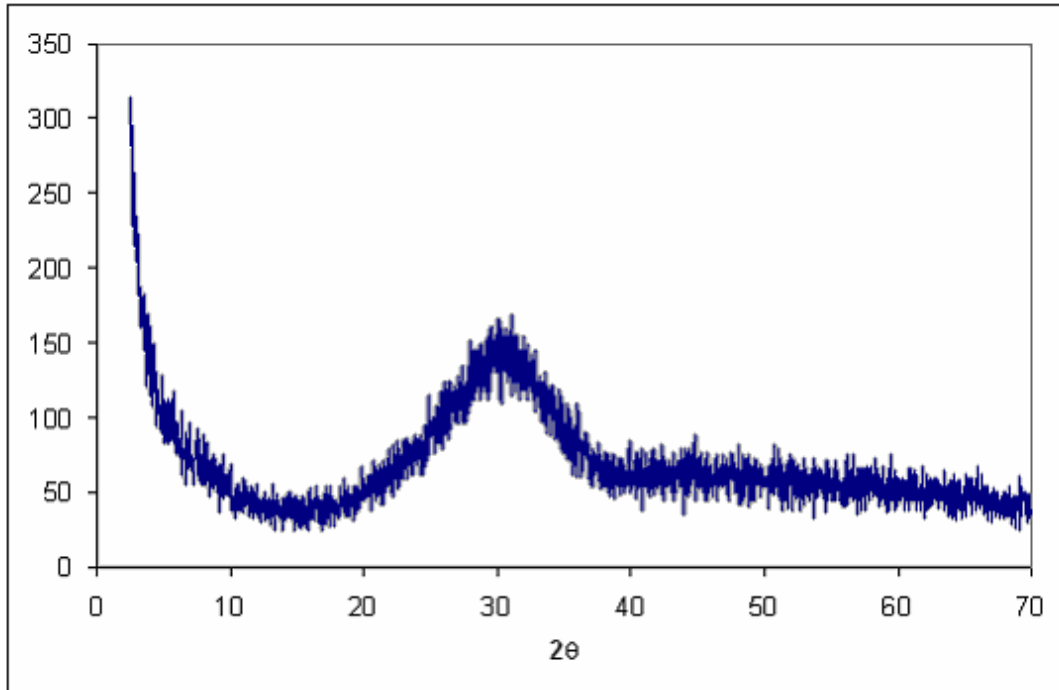


Figura 5.17 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura “D” (escória de aciaria visando a produção de lã de vidro), com vazamento do material fundido a 1400°C.

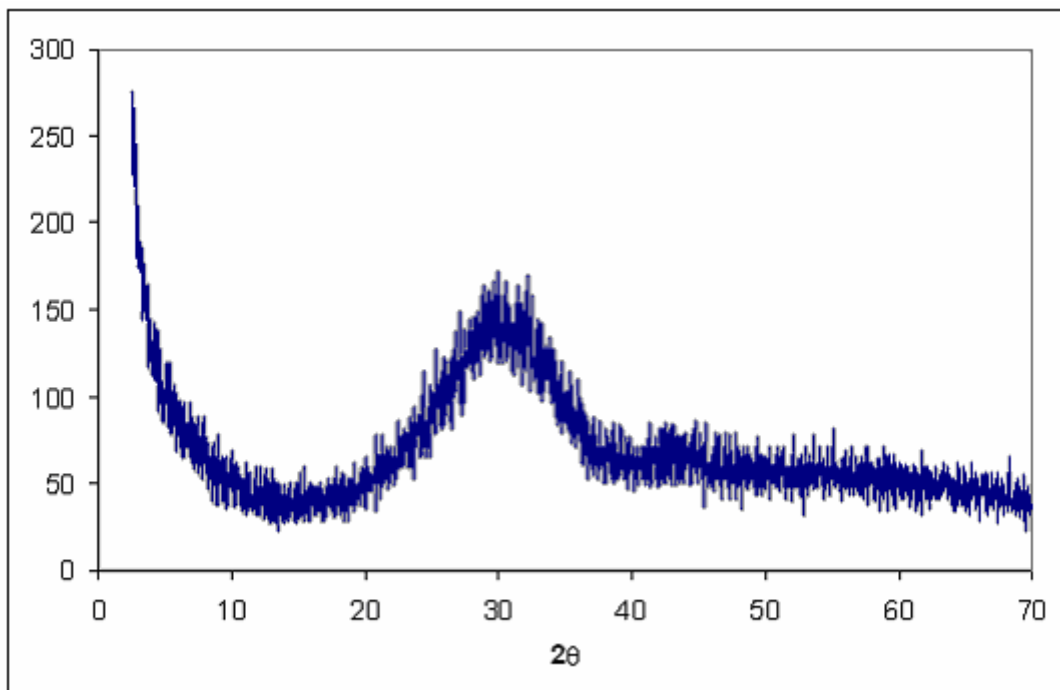


Figura 5.18 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura “D” (escória de aciaria visando a produção de lã de vidro), com vazamento do material fundido a 1450°C.

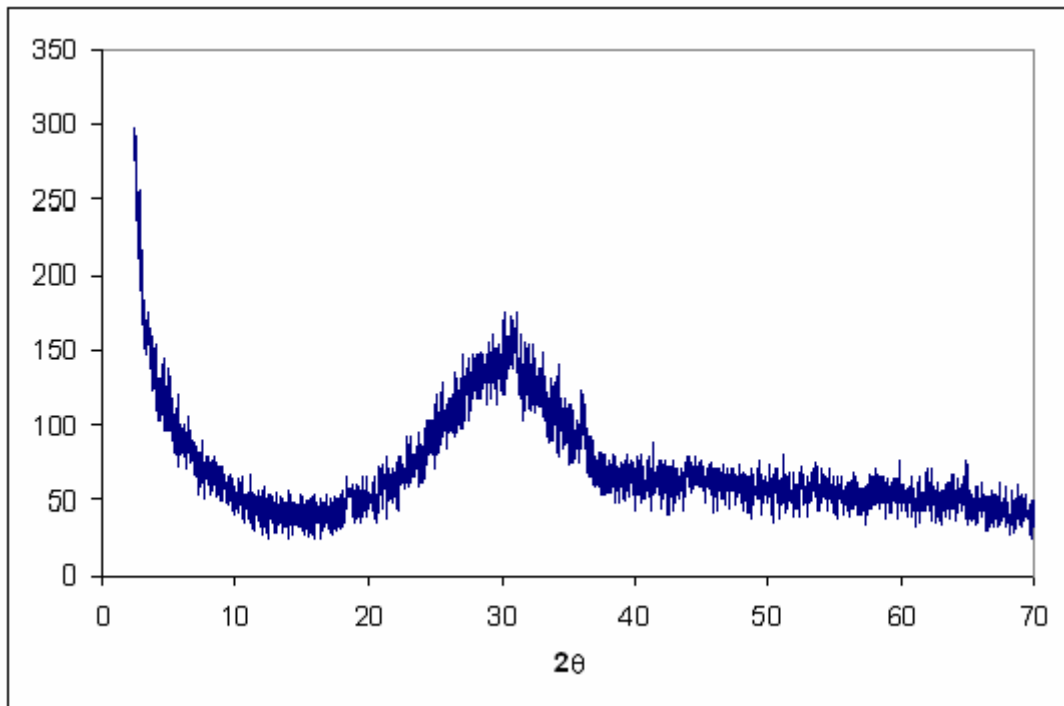


Figura 5.19 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura “D” (escória de aciaria visando a produção de lã de vidro), com vazamento do material fundido a 1500°C.

As Figuras 5.20, 5.21 e 5.22 apresentam os difratogramas de raios-X dos produtos obtidos através da mistura “E” (que visou a fabricação de lã de rocha). A mistura “F” (que visou a fabricação de lã de vidro) possui os difratogramas exibidos nas Figuras 5.23, 5.24 e 5.25.

Estas duas misturas tiveram como matéria-prima principal uma associação do resíduo do corte de granito e da escória de aciaria. Pode-se observar picos largos nas curvas de difração destes materiais, o que caracteriza a formação de uma estrutura amorfa. Portanto, devido a ausência de picos cristalinos, pode-se afirmar que estes materiais sofreram um processo de resfriamento eficiente para a formação de vidros.

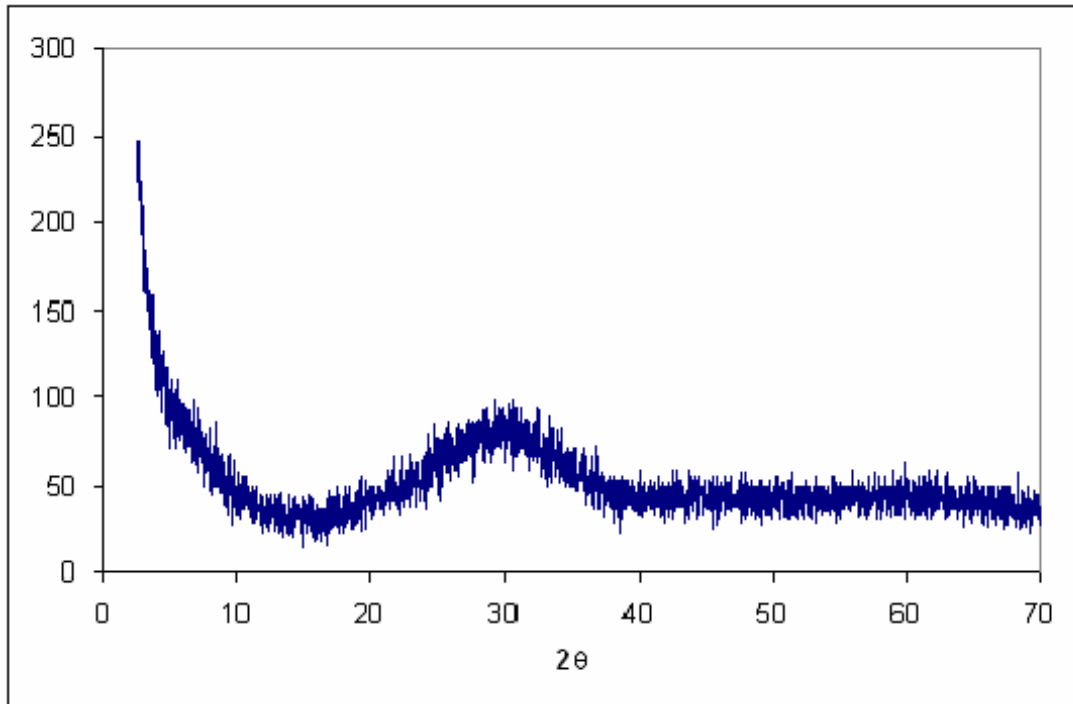


Figura 5.20 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura “E” (resíduo de granito + escória de aciaria visando a produção de lâ de rocha), com vazamento do material fundido a 1400°C.

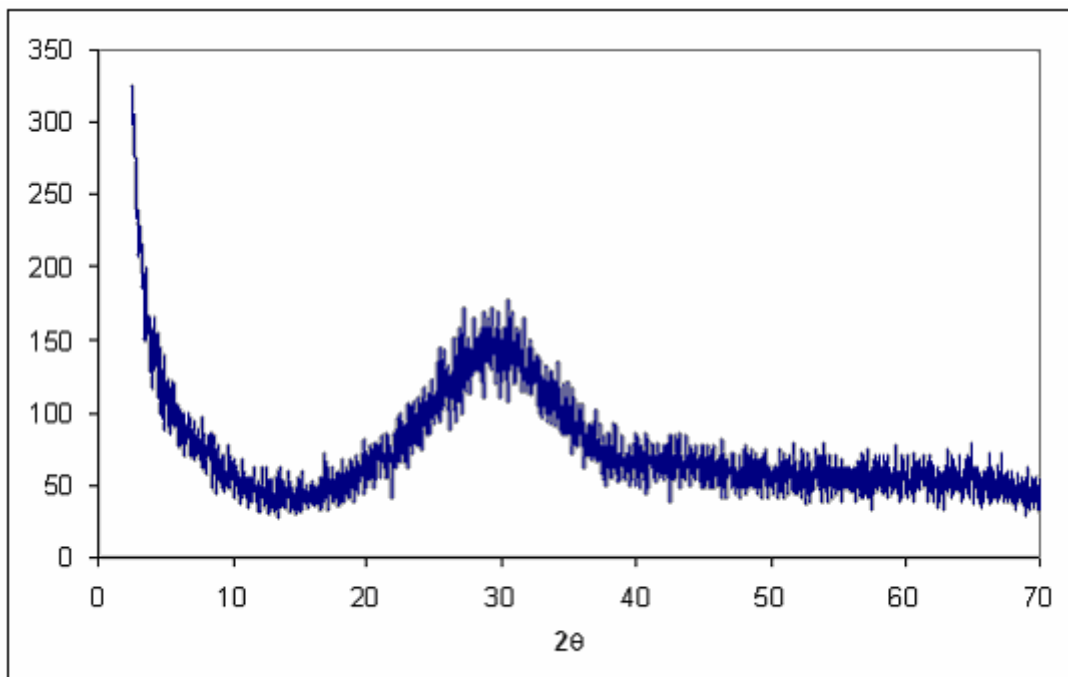


Figura 5.21 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura “E” (resíduo de granito + escória de aciaria visando a produção de lâ de rocha), com vazamento do material fundido a 1450°C.

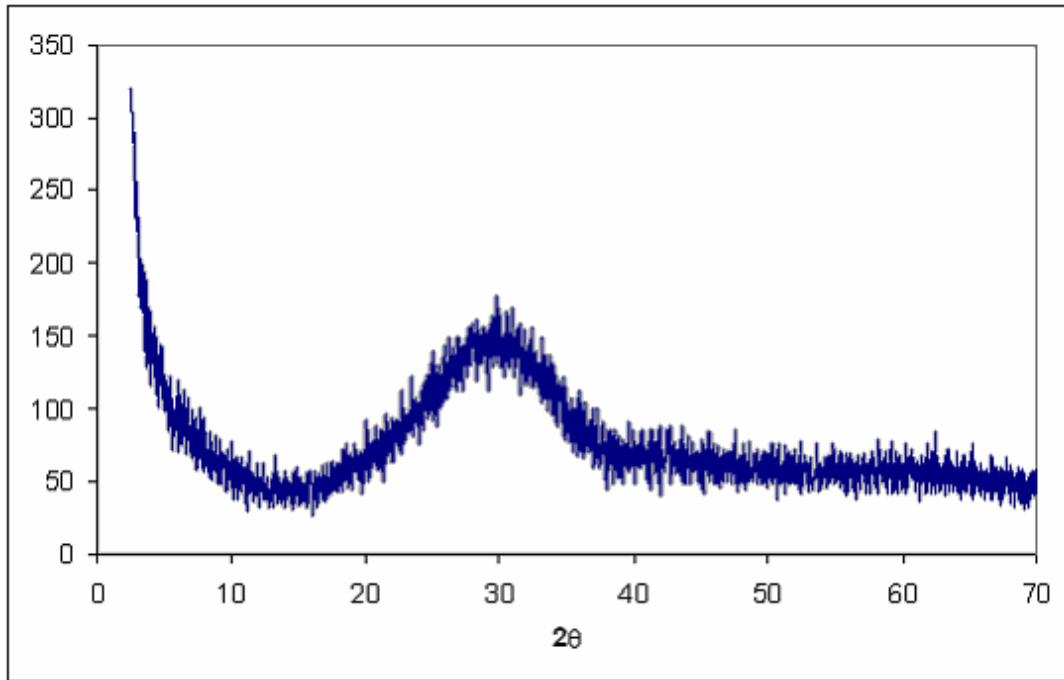


Figura 5.22 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura "E" (resíduo de granito + escória de aciaria visando a produção de lâ de rocha), com vazamento do material fundido a 1500°C.

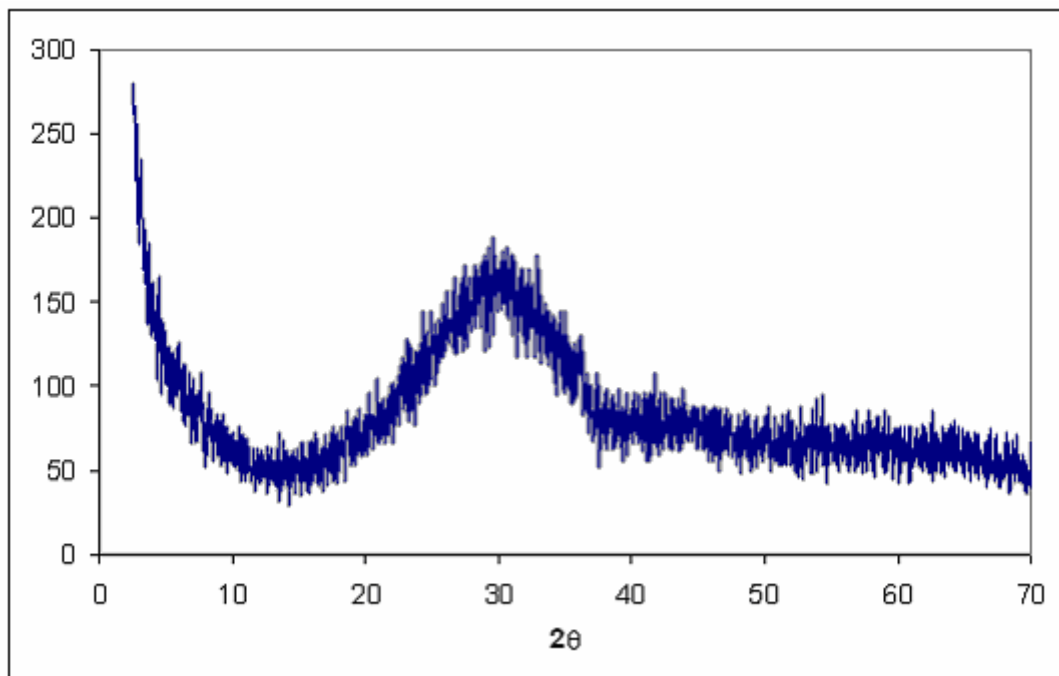


Figura 5.23 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura "F" (resíduo de granito + escória de aciaria visando a produção de lâ de vidro), com vazamento do material fundido a 1400°C.

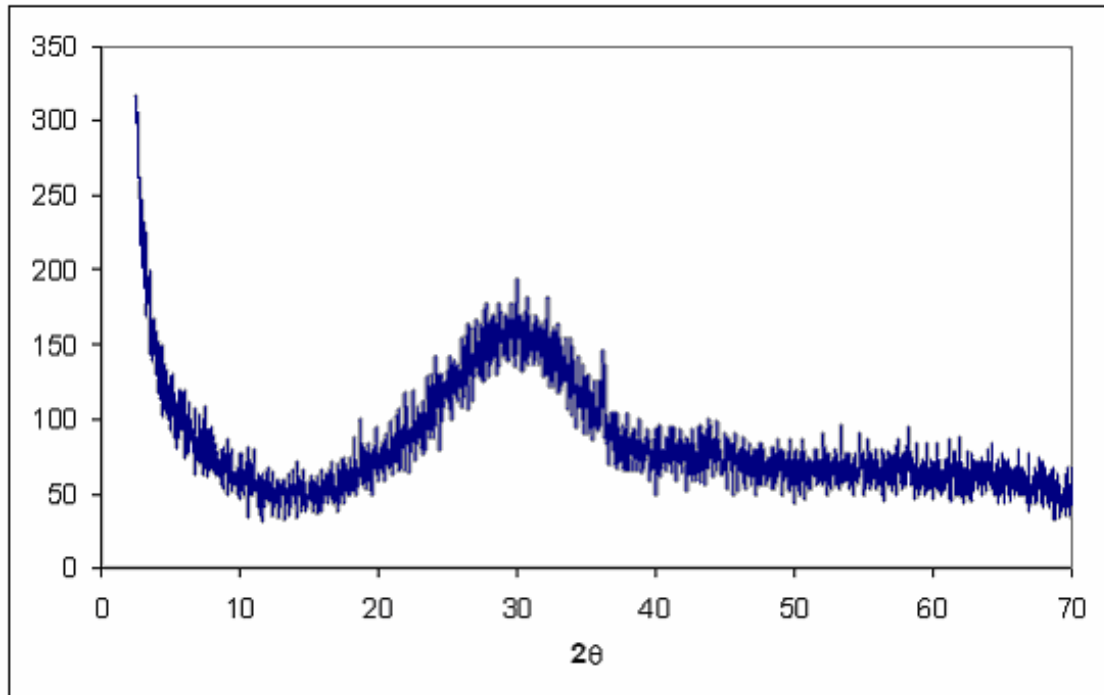


Figura 5.24 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura "F" (resíduo de granito + escória de aciaria visando a produção de lã de vidro), com vazamento do material fundido a 1450°C.

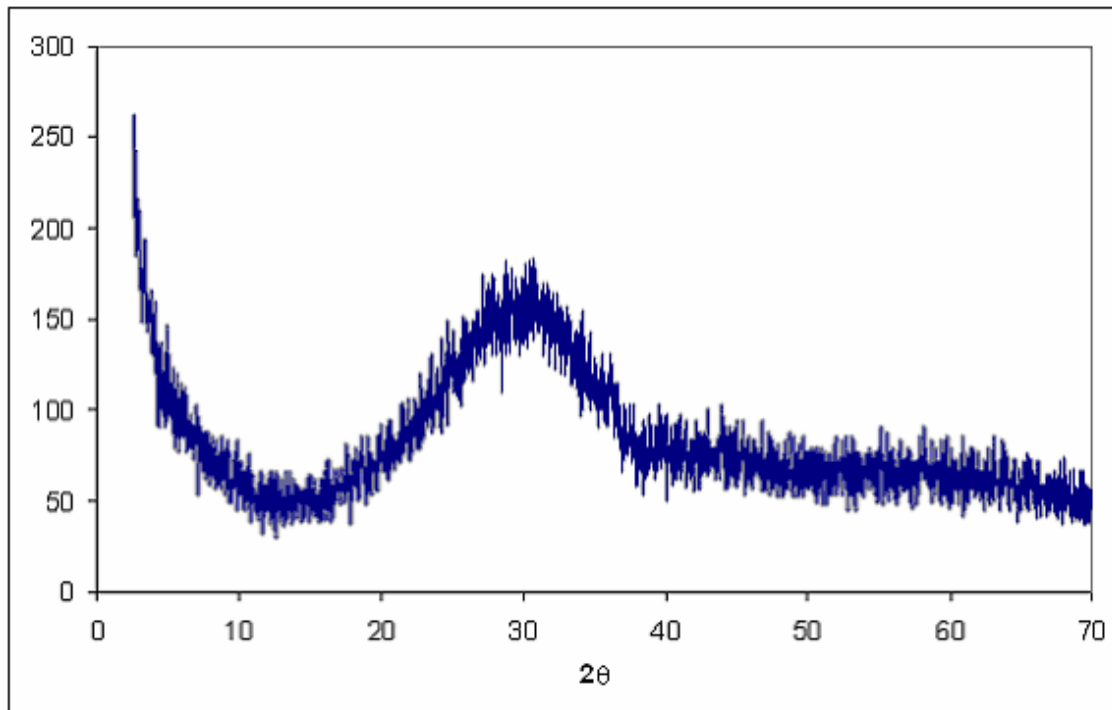


Figura 5.25 - Espectro de difração de raios-X do produto obtido através da mistura "F" (resíduo de granito + escória de aciaria visando a produção de lã de vidro), com vazamento do material fundido a 1500°C.

A Figura 5.8 traz o espectro de difração de raios-X de uma amostra de lã de vidro comercializada atualmente. Através da análise desta, nota-se a semelhança com as curvas de difração dos materiais produzidos, devido aos picos largos apresentados em ambos. Portanto, pode-se afirmar que estes materiais são predominantemente amorfos.

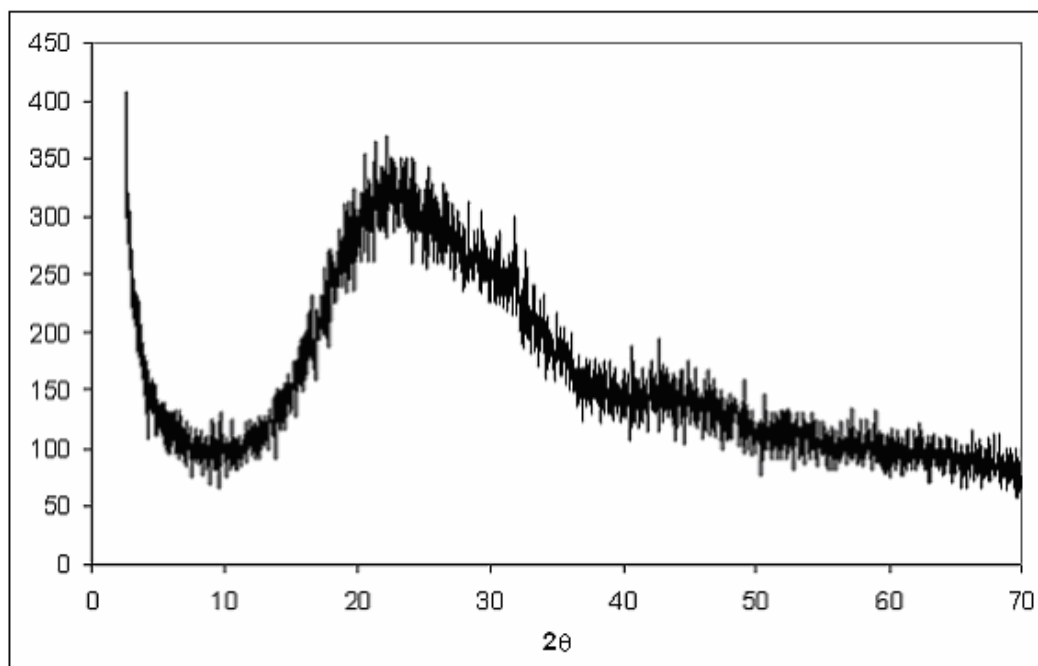


Figura 5.26 - Espectro de difração de raios-X de uma amostra de lã de vidro comercializada atualmente.

5.6. ANÁLISES MICROESTRUTURAIS DOS MATERIAIS FORMADOS

As imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura dos diferentes materiais formados estão dispostas neste tópico. Para todas as análises foram selecionados os produtos obtidos com o vazamento do material fundido a 1450°C, como descrito na metodologia deste trabalho.

Através da análise destas imagens, pode-se concluir que a micrografia da maioria dos materiais formados apresentou um aspecto homogêneo (como pode ser observado nas Figuras 5.30, 5.31, 5.32 e 5.33), não apresentando fases secundárias.

A exceção se deve as micrografias dos materiais produzidos através das misturas “A” (visando a produção de lâ de rocha) e “B” (visando a produção de lâ de vidro), ou seja, produzidas a partir do resíduo do corte de granito como matéria-prima principal (mostradas nas Figuras 5.28 e 5.29). Comprovando os resultados apresentados na difração de raios-X (tópico 5.5) foram encontrados traços do espinélio ($MgO.Al_2O_3$) como fase secundária.

A identificação desta fase foi possível através do mapeamento da composição química por EDS, conforme mostrado na Figura 5.27. Nesta figura pode-se observar que os picos de maior intensidade são o do alumínio (31,58%) e o do magnésio (12,62%), o que caracteriza a fase formada pelo espinélio. Trata-se de um pequeno grupo de partículas com dimensões de aproximadamente $2\mu m$. O espinélio foi encontrado nas regiões marcadas com “(1)” nas Figuras 5.28 e 5.29.

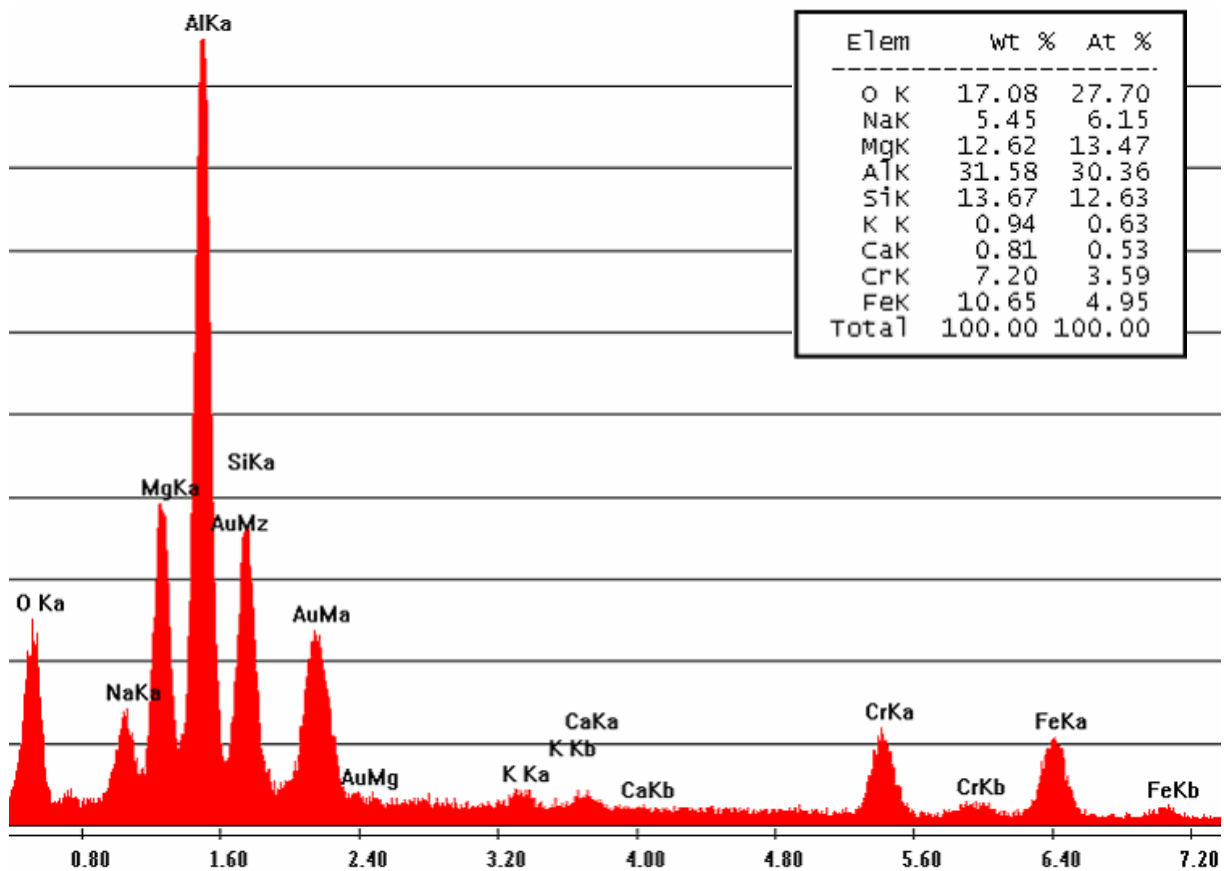


Figura 5.27 - Mapeamento da composição química por EDS de uma fase secundária encontrada nos materiais produzidos através das misturas “A” e “B”.

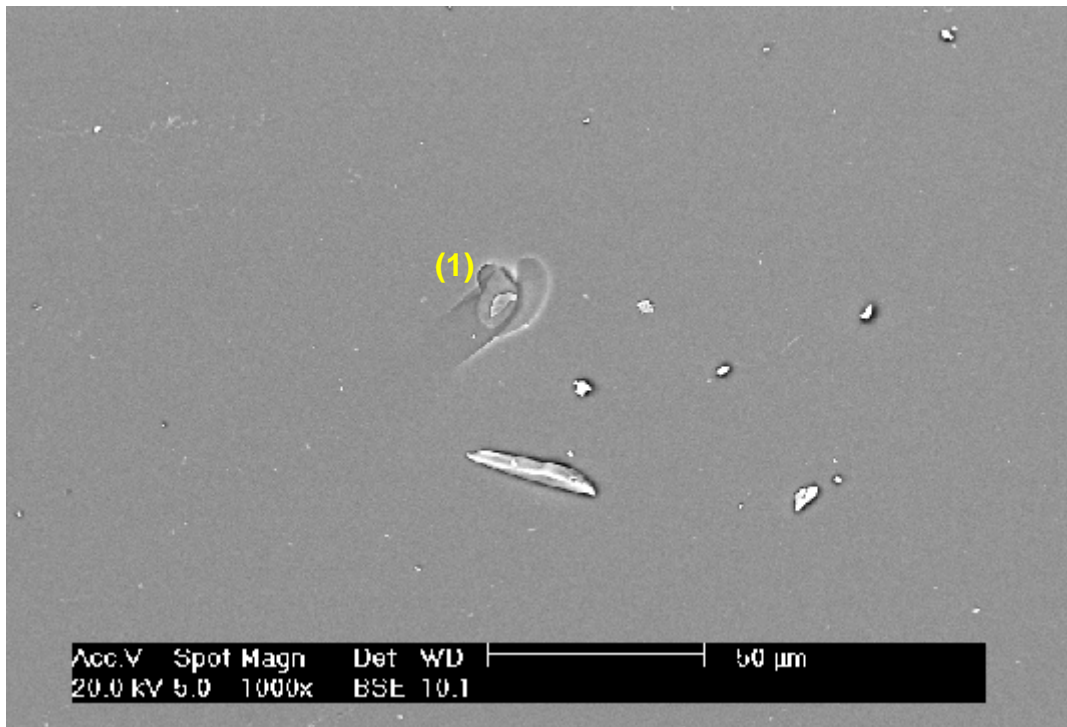


Figura 5.28 - Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura do produto obtido através da mistura “A” (resíduo de granito visando a produção de lã de rocha):
 (1) - fase secundária encontrada (espinélio).

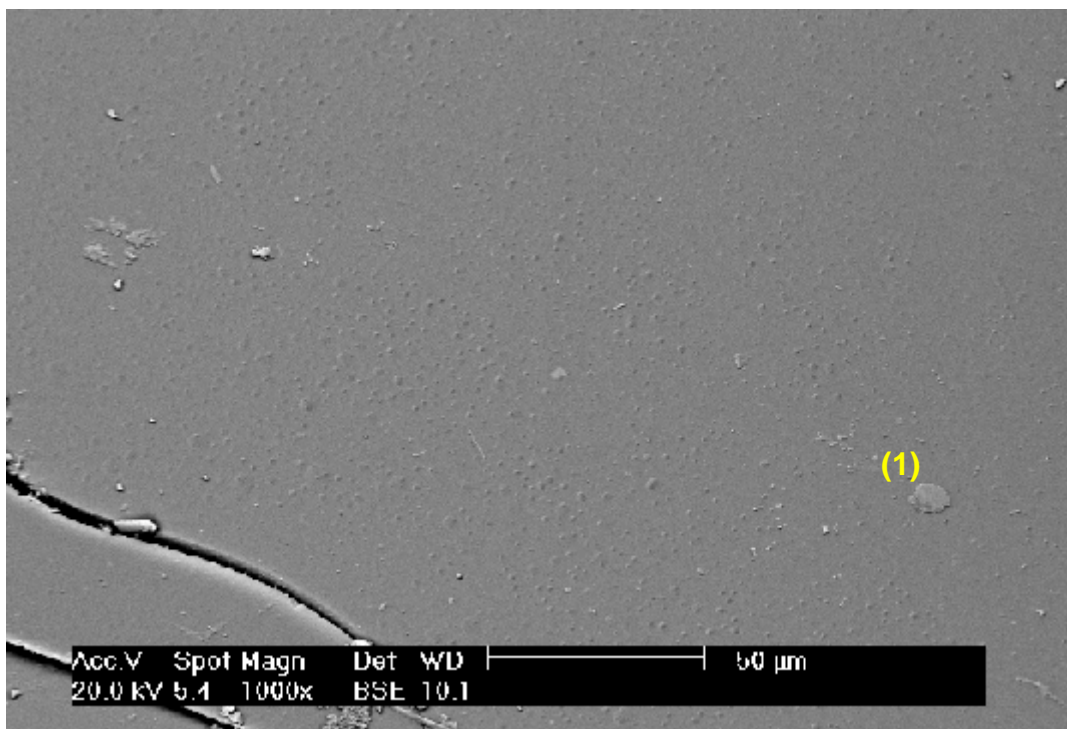


Figura 5.29 - Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura do produto obtido através da mistura “B” (resíduo de granito visando a produção de lã de vidro) :
 (1) - fase secundária encontrada (espinélio).

Os produtos formados com a escória de aciaria como matéria-prima principal não apresentaram fases secundárias, o que pode ser comprovado pelo aspecto homogêneo exibido nas Figuras 5.30 e 5.31.

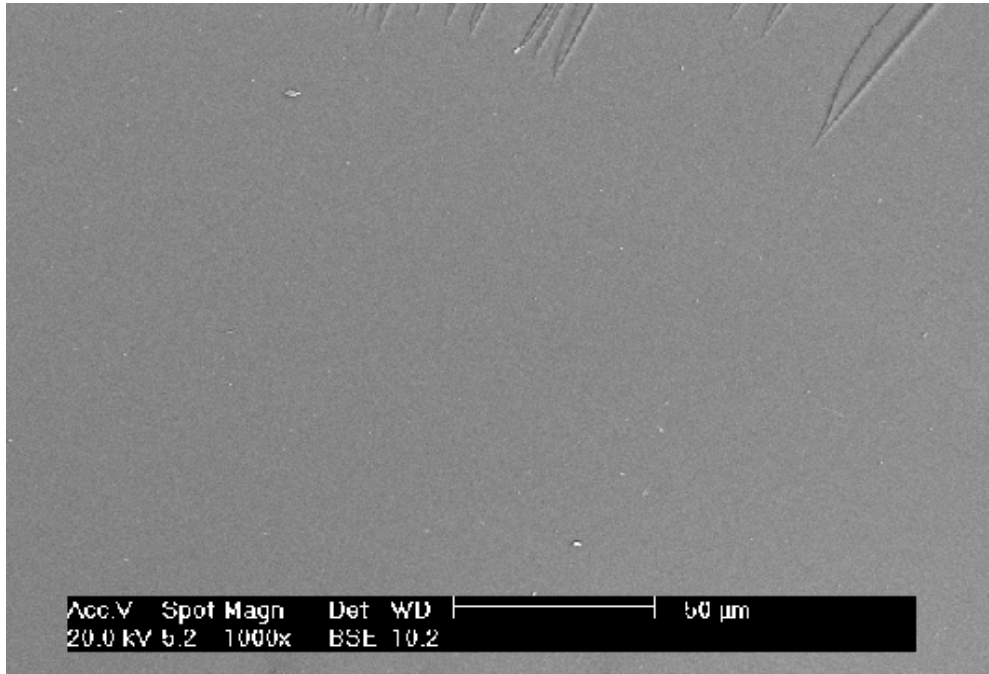


Figura 5.30 - Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura do produto obtido através da mistura "C" (escória de aciaria visando a produção de lã de rocha).

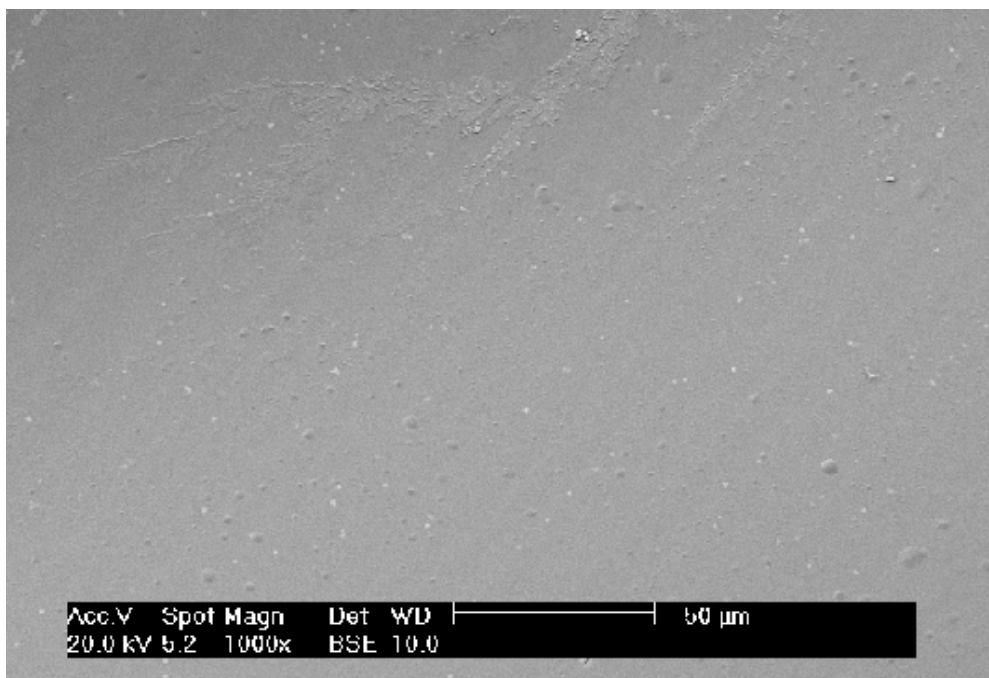


Figura 5.31 - Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura do produto obtido através da mistura "D" (escória de aciaria visando a produção de lã de vidro).

As micrografias mostradas pelas Figuras 5.32 e 5.33 apresentaram um aspecto homogêneo, portanto pode-se concluir que os produtos formados com a mistura do resíduo de granito e da escória de aciaria não apresentaram fases secundárias.

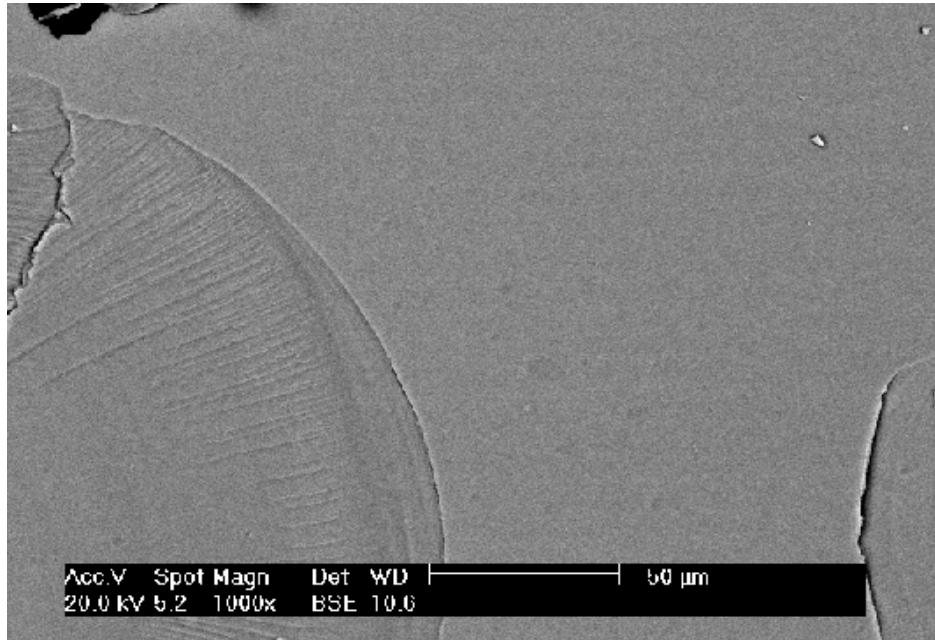


Figura 5.32 - Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura do produto obtido através da mistura "E" (resíduo de granito + escória de aciaria visando a produção de lã de rocha).

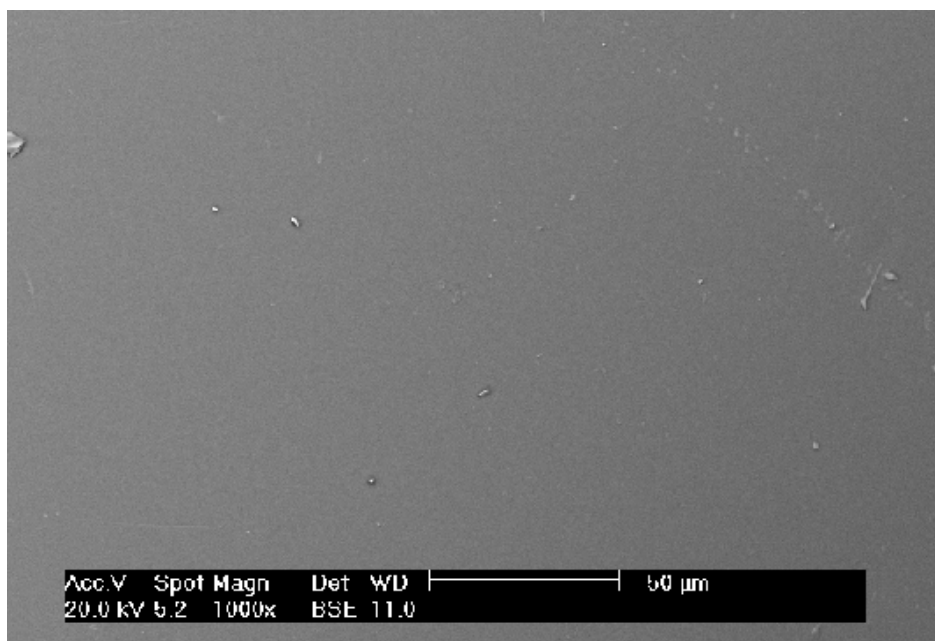


Figura 5.33 - Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura do produto obtido através da mistura "F" (resíduo de granito + escória de aciaria visando a produção de lã de vidro).

5.7. VISCOSIDADE HERTY (FLUIDEZ)

Neste tópico serão discutidos os resultados dos ensaios realizados com o Viscosímetro Herty. Apesar do nome, este aparelho fornece valores da fluidez do material, ou seja, o quanto o material consegue fluir antes de solidificar.

Segundo BANSAL e DOREMUS (1986), a fluidez (ou o seu inverso, a viscosidade) de um material vítreo é uma das mais importantes propriedades tecnológicas durante a produção de vidros. Ela determina as condições de fusão, as temperaturas de trabalho e a taxa de devitrificação.

Segundo AKERMAN (2000), durante a conformação, o vidro é resfriado e com isso ganha viscosidade. Quando a peça já está na sua forma definitiva, o vidro tem que estar viscoso o bastante para não continuar a fluir. Nos ensaios realizados neste trabalho foi observada esta característica nos produtos formados. Para todos os materiais, quando a temperatura de vazamento foi abaixada (de 1500°C para 1450°C, e depois para 1400°C) obteve-se uma maior viscosidade.

Teoricamente, é possível formar vidros de qualquer material, bastando que este seja resfriado suficientemente rápido para tanto. Porém, na prática, os materiais que podem vir a constituir vidros são aqueles que possuem a característica de ter uma certa alteração de viscosidade com a variação da temperatura (DOREMUS, 1994).

A temperatura máxima de fusão é definida como sendo aquela na qual o vidro que esta sendo elaborado atinja uma fluidez tal que permita a retirada de bolhas e a homogeneização química necessária para o produto. Para o início da conformação, a viscosidade deve apresentar valores que permitam a deformação do vidro sem grandes esforços. Ao final da conformação, a viscosidade deve estar em um nível que mantenha a forma final da peça (CHAUDHARI et al., 1980).

A fluidez dos fundidos é claramente um fator importante na formação vítrea. A cristalização será fortemente impedida se o fundido apresentar uma baixa fluidez na temperatura de fusão. Quando se adiciona alumina (óxido de alumínio) em uma formulação de vidro silicato-alcálico, o vidro se torna mais viscoso (ou seja, diminui-se a fluidez) em temperaturas elevadas (DOREMUS, 1994).

Durante os ensaios realizados, foi possível observar que os materiais fabricados a partir do resíduo do corte de granito constituíram valores de fluidez abaixo dos demais. A explicação para tal fato é a alta quantidade de alumina (19,27%) presente neste resíduo, uma vez que este elemento é responsável pelo aumento da viscosidade, e portanto diminuição da fluidez.

A Tabela V.6 apresenta os resultados dos ensaios de Viscosidade Herty (fluidez) encontrados para os diferentes tipos de materiais formados.

Tabela V.6 - Resultados dos ensaios de Viscosidade Herty (Fluidez) registrados.

Mistura	Matéria-Prima Utilizada	Material Pretendido	Temperatura de Vazamento	Viscosidade Herty (Fluidez)
A	Resíduo de granito	Lã de rocha	1400°C	4 cm
			1450°C	5 cm
			1500°C	7 cm
B	Resíduo de granito	Lã de vidro	1400°C	3 cm
			1450°C	5 cm
			1500°C	7 cm
C	Escória de aciaria	Lã de rocha	1400°C	12 cm
			1450°C	15 cm
			1500°C	18 cm
D	Escória de aciaria	Lã de vidro	1400°C	14 cm
			1450°C	17 cm
			1500°C	20 cm
E	Resíduo de granito + Escória de aciaria	Lã de rocha	1400°C	11 cm
			1450°C	13 cm
			1500°C	16 cm
F	Resíduo de granito + Escória de aciaria	Lã de vidro	1400°C	10 cm
			1450°C	11 cm
			1500°C	13 cm

Através da análise da Tabela V.6 pode-se comprovar que o excesso de alumina presente nos produtos que tiveram o resíduo do corte de granito (14,20% para a mistura “A” e 6,20% para a mistura “B”) afetou a fluidez destes materiais.

Para os produtos obtidos através da mistura “A” (que visou a produção de lã de rocha) a fluidez registrada variou de 4cm (para o vazamento a 1400°C) até 7cm (para o vazamento a 1500°C). A mistura “B” (que visou a fabricação de lã de vidro) gerou produtos com fluidez de 3cm (para vazamento a 1400°C) até 7cm (para vazamento a 1500°C).

A Tabela V.6 também mostra que os valores da fluidez aumentaram proporcionalmente com o aumento da temperatura de vazamento. Os materiais que apresentaram a maior variação da fluidez com o aumento da temperatura foram os produzidos com a escória de aciaria como matéria-prima principal. Para as misturas “C” (que visou a fabricação de lã de rocha) e “D” (que visou a fabricação de lã de vidro) ocorreu uma variação de 6cm com o aumento da temperatura de vazamento de 1400°C para 1500°C.

Os maiores valores de fluidez foram registrados pelo produto que teve a escória de aciaria como matéria-prima principal e que visou a produção de lã de vidro (mistura “D”). Para este material foram registrados os valores de 14cm (vazamento a 1400°C), 17cm (vazamento a 1450°C) e 20cm (vazamento a 1500°C). Tal fato pode ser explicado pela relação entre os óxidos que favorecem a fluidez e os que aumentam a viscosidade do material. Como foi ilustrado pela Figura 4.4, o componente que mais favorece a fluidez de um material vítreo é o óxido de sódio (Na_2O), sendo que, 11,30% foi a porcentagem deste óxido encontrada na composição química do material (como foi registrado na Tabela V.4). Como dito anteriormente, a alumina (Al_2O_3) é o óxido que implica no maior aumento da viscosidade de um material, sendo que, deste componente foi registrado um teor de 2,20% na composição química do material citado (valor exibido na Tabela V.4). Portanto, a relação $\text{Na}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3$ registrada para os produtos da mistura “D” foi de, aproximadamente, 5% de óxido de sódio para cada 1% de alumina encontrada, sendo esta a maior relação entre todos os produtos obtidos.

6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados encontrados neste trabalho pode-se concluir que:

1 - O resíduo do corte de granito pode ser empregado como uma fonte de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), componentes essenciais na produção das lãs de vidro e de rocha. Entretanto, o seu uso como matéria-prima principal para a produção destas lãs mostrou-se restrito devido aos valores de fluidez apresentados no momento do vazamento do material.

2 - A utilização da escória de aciaria como matéria-prima principal para a produção da lã de rocha mostrou-se eficiente, sendo recomendável a utilização deste resíduo para tal. Para a produção de lã de vidro a utilização deste resíduo metalúrgico requer adições de sílica em quantidades superiores a da escória.

3 - A fabricação de lãs de vidro e de rocha a partir de uma associação entre o resíduo do granito e a escória de aciaria como matérias-primas principais possibilita a utilização destes dois resíduos industriais, principalmente para a produção de lã de rocha.

4 - O reaproveitamento do resíduo de corte de granito e da escória de aciaria é aplicável à produção de lãs de vidro, entretanto estes resíduos não devem ser utilizados em quantidades superiores a 30% do total da mistura. Para a fabricação de lã de rocha estes resíduos mostraram-se amplamente aplicáveis, podendo assumir valores de até 70% do total da mistura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 10.004 resíduos sólidos: Classificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

ABRALISO. **Associação Brasileira dos Fabricantes de Lãs Isolantes**. Disponível em: <<http://www.abraliso.org.br>>. Acessado em 30/07/2007.

AKERMAN, M. **Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro**. In: PALESTRA NO CENTRO TÉCNICO DE ELABORAÇÃO DO VIDRO, Saint-Gobain Vidros Brasil, 2000.

AFMA. **Manufacturing: Synthetic and Cellulosic Fiber Formation Technology**. American Fiber Manufacturers Association Inc. Disponível em: <<http://www.fibersource.com/f-tutor/techpag.htm>>. Acessado em 01/10/2007.

AGENDA 21. **Conferência Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento**. Organização das Nações Unidas (ONU). Rio de Janeiro, Brasil, 1992.

ALMEIDA, A. E. de; SILVA FILHO, C. M. **Utilização da Escória de Aciaria LD da Belgo Mineira: Usina de Monlevade**. Biblioteca Técnica, ArcelorMittal. Disponível em: <<http://www.arcelormittal.com/br/>>. Acessado em 26/09/2007.

ALMEIDA, M. L. O. D.; VILHENA, A. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000.

ALVES, J. O. **Compósitos Cerâmicos de Mulita-Alumina - Estudo de Caso: Compósito de Mulita Obtida a Partir do Mineral Topázio**. Monografia de conclusão de curso, Departamento de Física, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, 2006.

ANGULO, S. C. ; ZORDAN, S. E. ; JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil.** In: IV SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO, 2001, São Paulo. IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e Reciclagem na Construção. São Paulo : IBRACON CT-206/ IPT/ IPEN/PCC, 2001.

BAAN, R. A.; GROSSE, Y. **Man-made mineral (vitreous) fibres: evaluations of cancer hazards by the IARC Monographs Programme.** Mutation research, v.81, p. 43-58, 2004.

BANSAL, N.P.; DOREMUS, R.H. **Handbook of Glass Properties.** Academic Press Inc., London, England, 1986.

BORGES, P. R. **Incorporação de Resíduo Industrial de Lã de Vidro em Matriz de Concreto.** Dissertação de Mestrado, 112p., Rede Temática em Engenharia de Materiais (UFOP/CETEC/UEMG), Ouro Preto, Brasil, 2007.

BRAGA, O. J. **O Aproveitamento de Lã de Vidro Residual em Matriz de Gesso.** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, USP, São Paulo, Brasil, 1991.

BRANCO, V.T.F. C. **Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado.** Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

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

BUCK, R. L. **Man-Made Vitreous Fibers.** Technical Manual NEHC-TM6290.91-1, Rev. A, Navy Environmental Health Center, USA, 1997.

CALLISTER, W.D. **Materials Science and Engineering: An Introduction.** 6th ed., John Wiley & Sons. U.S.A., 2003.

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: XIV JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, CETEM, UFRJ, 2006.

CHAUDHARI, P. ; GIESSEN, B. C. ; TURNBULL, D. **Metallic Glasses**. Scientific American, v. 242 (4): p. 84-96, 1980.

CVRD. **Notícias: Aço**. Companhia Vale do Rio Doce, Brasil. Disponível em: <<http://www.cvrd.com.br/cvrd/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=93>>. Acessado em 10/08/2007.

DELLA, V. P., JUNKES, J. A., KUHN, I., HIELLA, H. G., HOTZA, D. **By-product Utilization of Metallic Recovering of Stainless Steel Slags in The Ceramic Pigments Synthesis: Raw Material Characterization**. Cerâmica, 2005, vol. 51, n. 318.

DNPM. **Anuário Mineral Brasileiro 2001**. Departamento Nacional da Produção Mineral, Brasil, 2001. Disponível em: <www.dnpm.gov.br>. Acessado em 20/05/2007.

DOREMUS, R.H. **Glass Science**. John Wiley & Sons Includes, New York, U.S.A., 1994.

FARINA, A. B. **Uso do Software ThermoCalc para Cálculos de Dados Termodinâmicos**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

FERREIRA, E. B.; ZANOTTO, E. D. ; SCUDELLER, L. A. M. **Nano Vitrocerâmica de Escória de Aciaria**. Química Nova, Brasil, v. 25, n. 5, p. 731-735, 2002-a.

FERREIRA, H. S. ; MENEZES, R. R. ; FERREIRA, H. C. ; NEVES, G. A. **Uso de Rejeitos de Granitos como Materias Primas Cerâmicas**. Cerâmica, São Paulo, v. 48, n. 306, p. 92-101, 2002-b.

GOBBO, L. A. **Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, USP, São Paulo, Brasil, 2003.

GUPTA, P.K. **Non-crystalline solids: glasses and amorphous solids.** J. Non-Cryst. Solids, v. 195, p. 158-164, 1996.

HARA, S.; INOUE, K.; TANAKA, T. **Viscosity of molten slags containing iron oxide Molten Slags.** Iron and Steel Society Fluxes and Salts '97 Conference, p. 515, Sydney, Australia, 1997.

HLAVÁČ, J. **The Technology of Glass and Technology: an Introduction.** Elsevier Science Publishing Company Inc., New York, U.S.A., v. 4, p. 55-227, 1983.

IBAR. **Castimag IBAR 90.** Folha de Dados Técnicos, Código 0660, Revisão 05, Indústrias Brasileiras de Artigos Refratários - IBAR Ltda. 2007.

IBS. **Uso da escória de aciaria é debatido no RJ.** Canal de notícias, Instituto Brasileiro de Siderurgia, Brasil, 2007. Disponível em: <<http://www.ibs.org.br/noticias.asp>>. Acessado em 14/08/2007.

ISOVER. **Destino de resíduos de lã de vidro.** Saint-Gobain Vidros S.A., Divisão Isover. Disponível em: <http://www.isover.com.br/isover/sigi_residuos.htm>. Acessado em 15/09/2007.

ISOVER. **Forrovid.** Divulgação de produto, Saint-Gobain Vidros S.A., Divisão Isover, 2005. Disponível em: <<http://www.saint-gobain-isover.com.br>>. Acessado em 15/10/2007.

JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável, construção civil, reciclagem e trabalho multidisciplinar.** Textos Técnicos, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica, USP, São Paulo, Brasil, 2006.

JURY, J. B. R. B. **Cinétique de Cristallisation et Altération Post-Magmatique d'une Cheminée Basaltique du Complexe Volcanique de Lisbonne**. Tese de Doutorado, Université POITIERS, França, 1997.

KEENE, B. J. **Slag Atlas**. 2nd ed., p. 512, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, Alemanha, 1995.

KOMATSU, C.E. **Co-processamento de Resíduos Industriais em Fornos de Clínquer**. In: PALESTRA, ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland, 2004.

LABRINCHA, J. **Sub Projecto de Isolamento Térmico: 1º Relatório de Progresso**. Associação para o Desenvolvimento da Casa do Futuro, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2006.

LUOTO, K.; HOLOPAINEN, M.; KANGAS, J.; KALLIOKOSKI, P.; SAVOLAINEN, K. **Dissolution of short and long rockwool and glasswool fibers by macrophages in flowthrough cell culture**. Environ. Res. Sect. A 78, pp. 25–37., 1998.

MACHADO, A.T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, USP, São Paulo, Brasil, 2000.

MAGELLA, M. A. **Desenvolvimento de materiais vítreos e vitro-cerâmicos a partir de escórias da produção de aços inoxidáveis**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 1999.

MANCIO, M. **Contribuição ao Estudo do Fenômeno da Instabilidade Volumétrica das Escórias de Aciaria Elétrica**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, UFRGS. Porto Alegre, Brasil, 2001.

- MARABINI, A. M.; PLESCIA, P.; MACCARI, D.; BURRAGATO, F.; PELINO, M. **New materials from industrial and mining wastes: glass-ceramics and glass-and rock-wool fibre**. International Journal of Mineral Processing, Volume 53, Issues 1-2, February 1998, Pages 121-134.
- MEDINA, H. V. **Produção e Uso Sustentável de Materiais: Gestão Ambiental e Análise do Ciclo de Vida**. In: 61º CONGRESSO ANUAL DA ABM - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 2006, Rio de Janeiro. Anais do 61º Congresso Anual da ABM. São Paulo, Brasil, 2006. v. 02. p. 1781-1790.
- MENEZES, R. R. ; NEVES, G. A. ; FERREIRA, H. C. **O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 303-313, 2002.
- MORAES, I. V. M. de. **Mármore e Granito: Lavra, Beneficiamento e Tratamento de Resíduos**. Rede de Tecnologia do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2006. Disponível em: <<http://sbrt.ibict.br/upload/dossies/sbrt-dossie21.pdf>>. Acessado em 16/10/2006.
- 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**, Cerâmica, v. 49, n. 312, pp. 262-267, 2004.
- MOTHÉ FILHO, H. F. ; MOTHÉ, C. G. ; POLIVANOV, H. **Reciclagem de resíduos sólidos de rochas ornamentais**. Anuário do Instituto de Geociências/UFRJ, Rio de Janeiro, v. 28, p. 139-151, 2005.
- MOURA, W. A. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto**. Tese de doutorado, 190p., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 2000.

M.T.E. **NR 25 - Resíduos Industriais**. Legislação Brasileira, Normas Regulamentadoras, Ministério do Trabalho e Emprego, Brasil. Disponível em: <http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras/nr_25.asp>. Acessado em 03/11/2006.

MUSIKANT, S. **Optical Materials**. Marcel Dekker Includes, New York, U.S.A., vol. 6, 1985.

NETO, A. J. P. de C. e A. **A Reciclagem de Resíduos Sólidos na Construção Civil**. Trabalho de Conclusão de Curso - Especialização em Pós-Graduação Executiva em Meio Ambiente, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

N.T.P. **Glass Wool (Respirable Size)**. In: SEVENTH ANNUAL REPORT ON CARCINOGENS, Reasonably anticipated to be a human carcinogen, National Toxicology Program, USA, 1994.

OLIVEIRA, C.T.A. **Água do poro de pastas de cimentos de escória**. Tese de Doutorado, 162p., Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2000.

OLIVEIRA, L. C. P. **Panorama da Gestão de Resíduos: Evolução e Tendências**. In: WORKSHOP DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO SETOR MÍNERO-METARLÚGICO, 2004, Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <<http://www.abmbrasil.com.br/cim/download.asp>>. Acessado em 15/10/2006.

PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia: Microestrutura e Propriedades**. São Paulo, Editora Hemus, Edição Eletrônica, 2000. v. 01. 343 p.

PEREIRA, F. R. **Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composições cerâmicas e cimentícias**. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal. 2006.

PIORO, L. S.; PIORO, I. L. **Reprocessing of Metallurgical Slag into Materials for the Building Industry**. Int. Journal of Waste Management, 2004, v. 24, No. 4, pp. 365-373.

PMI, **Laboratório de Caracterização Tecnológica**. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://www.pmi.poli.usp.br/pmi/laboratorios/lct.asp>>. Acessado em 09/01/2008.

POLESE, M. de O.; CARREIRO, G. L.; SILVA, M. G. da. **Steel slag microstructural characterization**. Matéria, vol.11, n. 4, p. 442-452, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

REVISTA SANEAMENTO AMBIENTAL. **Resíduos Industriais**. In: IV SIMPÓSIO NACIONAL DE GERENCIAMENTO AMBIENTAL NA INDÚSTRIA, Revista n. 54, Pg. 16-24, Saneamento Ambiental, Brasil 1998. Disponível em: <http://www.maisprojetos.com.br/conteudos/temas/normas/residuos_industriais.pdf>. Acessado em 23/09/2006.

RIBEIRO, R. C. C. ; CARRISSO, R. C. C. ; CARVALHO, M. R. S. **Aplicação de Feldspatos Extraídos de Resíduos de Pedreiras de Granito nas Indústrias de Cerâmica e Vidro, Buscando-se as Tecnologias Limpas**. In: XII JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO CETEM, 2004, Rio de Janeiro. XII Jornad de Iniciação Científica do CETEM, 2004.

ROCHA, C. V. **Preparação e Caracterização de Vidros à Base de Escória de Alto-Forno**. Dissertação de Mestrado. Rede Temática em Engenharia de Materiais - REDEMAT (UFOP/CETEC/UEMG), Ouro Preto, Brasil, 1998.

ROCKFIBRAS. **Produtos**. Disponível em: <<http://www.rockfibras.com/la.htm>>. Acessado em 28/07/2007.

SANTOS, G. L. dos. **Máquinas e equipamentos**. Resposta Técnica, SENAI/RS, Rio Grande do Sul, Brasil, 2005. Disponível em: <<http://sbirt.ibict.br/upload/sbirt585.pdf>>. Acessado em 01/03/2007.

SILVA, A. B. da. **Reaproveitamento da lama de aciaria com baixo teor de ferro metálico na fabricação de cerâmica vermelha**. Dissertação de Mestrado, 85p., Rede Temática em Engenharia de Materiais (UFOP/CETEC/UEMG), Ouro Preto, Brasil, 2006.

SILVA, J. B. et al. **Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas**. Cerâmica, v.51, n.320, p.325-330, 2005.

SILVA, M. V. de A. M. ; LEITE, P. P. N. **Tratamento de Escória de Aciaria LD para Produção de Acerita**. Biblioteca Técnica, ArcelorMittal. Disponível em: <<http://www.arcelormittal.com/br/>>. Acessado em 30/12/2006.

SOUZA, J. N. ; RODRIGUES, J. K. G. ; SOUZA NETO, P. N. de . **Utilização do Resíduo Proveniente da Serragem de Rochas Graníticas como Material de Enchimento em Concretos Asfálticos Usinados à Quente**. Revista Interação, Campina Grande, v. 02, p. 13-17, 2003.

TERMOLAN. **Estudo de Impacte Ambiental (EIA) da Unidade Fabril I**. Resumo Não Técnico (RNT). Isolamentos Termo-Acústicos S.A., Santo Tirso, Portugal, 2005. Disponível em: <http://www.iambiente.pt/IPAMB_DPP/docs/RNT1446>. Acessado em 14/07/2007.

TRDIC, F. ; SIROK, B. ; BULLEN, P. R. ; PHILPOTT, D. R. **Monitoring Mineral Wool Production Using Real-Time Machine Vision**. Real-Time Imaging 5, 125-140, Academic Press, USA, 1999.

UEDA, M; MURASE, F.; TAKAHASHI, F.; MATSUMOTO, T. **An Optical System for Measuring the Eccentricity of Glass Wool Pipe - for Industrial Use**. Optics and Lasers in Engineering, issue 6, v. 31, , p. 493-50, 1999.

VILELA, A. C. F. **Geração e Processamento da Escória de Aciaria e Sua Transformação em Agregado Siderúrgico.** In: WORKSHOP - O AGREGADO SIDERÚRGICO- DA GERAÇÃO NAS ACIARIAS À UTILIZAÇÃO AMBIENTALMENTE SUSTENTÁVEL, São Paulo, 2006.

WILSON, R.; LANGER, A. M; NOLAN R. P. **A Risk Assessment for Exposure to Glass Wool.** Regulatory Toxicology and Pharmacology, Volume 30, Issue 2, Pages 96-10, October, 1999.

YUAN, M. C. **Ações Institucionais da Siderurgia Brasileira para Disseminação do Uso das Escórias de Aciaria.** Biblioteca Técnica, ArcelorMittal. Disponível em: <<http://www.arcelormittal.com/br/>>. Acessado em 26/09/2006.