

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
Programa de Pós-Graduação em Materiais para Engenharia  
Departamento de Física e Química - Instituto de Ciências  
Dissertação de Mestrado

**RECICLAGEM DE ESCÓRIA CRISTALIZADA PARA A  
PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS**

Alessandro Leonardo

**Orientador: Prof. Dr. Manoel Ribeiro da Silva – UNIFEI**

**Dezembro de 2006**

Alessandro Leonardo da Silva

## **Reciclagem de escória cristalizada para a produção de argamassas**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Universidade Federal de Itajubá, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Ciências dos Materiais para Engenharia.

Área de concentração: Polímeros e Cerâmicas.

**Orientador: Prof. Dr. Manoel Ribeiro da Silva – UNIFEI**

Itajubá, 2006

## **Agradecimentos**

A Deus, cheio de bondade, que me deu saúde e força de vontade para vencer todos os meus obstáculos;

À minha esposa e meu filho pelo carinho e paciência nas horas mais complicadas;

Aos meus pais Flávio e Terezinha por tudo que fazem e já fizeram por mim;

À minha irmã Adriana pelos empurrões durante o curso;

Prof. Dr. José Célio Dias, pela ajuda com os ensaios mecânicos;

Ao engenheiro Vander Alkmin, pela orientação nos ensaios regidos pela norma ABNT;

Ao professor Dr. Álvaro Antônio Alencar de Queiroz, exemplo de caráter, brilhantismo e dedicação, pela amizade e paciência nas horas difíceis;

Aos amigos da república, Marcelo e Nirton, pela força e companheirismo;

Aos amigos de Pouso Alegre, Ronaldo e Rodrigo, pelas caronas e conversas amigas;

Ao Senhor Clodomir de Barros da Fundação Vieira pela atenção dispensada durante o trabalho;

Aos amigos diretores, professores e funcionários da E. E. Quinto Alves Tolentino, em especial a minha amiga Maria do Carmo, por toda a ajuda e o apoio nas horas difíceis;

Aos amigos Kidney, Flávio, Paulo, Guilherme e Adriano pela amizade de longa data;

Por fim, a todos que, com seus conhecimentos, incentivos e críticas colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

## Dedicatória

Dedico este trabalho ao meu filho, minha esposa, meus pais e meus irmãos.

## SUMÁRIO

<b>Lista de figuras</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de tabelas</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de abreviaturas</b>	<b>xii</b>
<b>Resumo</b>	<b>xiii</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiv</b>
<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	<b>1</b>
<b>1.1 - Considerações iniciais</b>	<b>1</b>
<b>1.2 - Justificativa do tema</b>	<b>1</b>
<b>1.3 - Desafios da reciclagem</b>	<b>4</b>
<b>1.4 - A legislação ambiental</b>	<b>7</b>
<b>1.5 – Referências</b>	<b>8</b>
<b>Capítulo 2 – Revisão da literatura</b>	<b>9</b>
<b>2.1 - Considerações iniciais</b>	<b>9</b>
<b>2.2 - A indústria de fundidos</b>	<b>9</b>
<b>2.3 - A indústria de fundidos do centro-oeste de Minas</b>	<b>11</b>
<b>2.4 - A Escória</b>	<b>15</b>
<b>2.4.1 Histórico da reciclagem de escória de ferro</b>	<b>17</b>
<b>2.4.2 - Reciclagem atual de escória de ferro no mundo</b>	<b>18</b>
<b>2.4.3 - Reciclagem de escória de ferro no Brasil</b>	<b>19</b>
<b>2.5 - Pedras ornamentais</b>	<b>21</b>
<b>2.5.1 - Os granitos</b>	<b>21</b>

2.5.2 – Mármore	22
2.5.3 – Ardósia	23
2.6 - Reciclagem de corte de mármore, granito e ardósia	23
2.7 – Argamassa	24
2.7.1 - Tipos de Argamassa	25
2.7.2 – Emboço	27
2.8 – Considerações Finais	27
2.9 – Referências	28
<b>Capítulo 3 – Objetivos</b>	<b>31</b>
3.1 – Objetivo geral	31
3.2 – Objetivos específicos	31
<b>Capítulo 4 – Materiais e Métodos</b>	<b>32</b>
4.1 – Considerações iniciais	32
4.2 – Preparação dos compósitos para análise térmica	32
4.3 – Preparação das argamassas	35
4.4 – Ensaios realizados	37
4.4.1 – Argamassas no estado fresco	37
4.4.1.1 – Trabalhabilidade	37
4.4.1.2 – Retenção de água	38
4.4.2 – Argamassas no estado endurecido	39
4.4.2.1 – Resistência à compressão	39
4.4.2.2 – Absorção de água por imersão	41
4.4.2.3 – Absorção de água por capilaridade	42
4.4.3 – Revestimento	42

4.4.3.1 – Avaliação de fissuração	42
4.4.3.2 – Análise de imagens	43
4.5 – Referências	45
<b>Capítulo 5 – Resultados e Discussões</b>	<b>47</b>
5.1 - Considerações iniciais	47
5.2 - Análise termogravimétrica das amostras	47
5.3 – Estudo da trabalhabilidade	51
5.4 – Retenção de água	52
5.5 - Análise da resistência à compressão	53
5.6 - Estudo da absorção de água	54
5.6.1 - Absorção de água por imersão	54
5.6.2 - Absorção de água por capilaridade	55
5.7 – Estudo do revestimento	58
5.7.1 - Avaliação de fissuração	58
5.7.2 - Análise de imagens	61
5.8 – Referências	64
<b>Capítulo 6 – Conclusões</b>	<b>67</b>
<b>Capítulo 7 – Perspectivas futuras</b>	<b>68</b>

## Lista de figuras

---

Figura 1.1 - Mapa do estado de Minas Gerais com destaque para a região centro-oeste.....	2
Figura 1.2 - Principais cidades do centro oeste mineiro com destaque para Divinópolis, Itaúna e Cláudio, cidades com grande número de indústrias.....	3
Figura 1.3 - Fluxograma das etapas do processo de reciclagem.....	6
Figura 2.1 - Percentual da distribuição regional da produção de fundidos no estado de Minas Gerais. Fonte ABIFA.....	10
Figura 2.2 - Percentual do número de empresas de fundição no estado de Minas Gerais por região. Fonte ABIFA.....	11
Figura 2.3 - Fotografia (a) e desenho esquemático (b) de forno tipo cubilô. Canal de vazamento de ferro líquido (1), canal de vazamento de escória (2), interior do forno (3), sistema de refrigeração (4).....	12
Figura 2.4 - Fluxograma representativo do processo de obtenção de peças fundidas.....	13
Figura 2.5 - Vazamento de escória líquida em um forno tipo cubilô.....	14
Figura 2.6 - Escória cristalizada na forma de pedra bruta.....	15
Figura 2.7 - Extração de granito (a) e mármore (b.).....	22
Figura 2.8 - Extração (a) e descolamento das chapas de ardósia (b).....	23
Figura 2.9 - Camadas de acabamento de uma parede de tijolos.....	26
Figura 4.1 - Moinho de bolas utilizado neste trabalho.....	33
Figura 4.2 - Pó de escória obtido neste trabalho.....	33
Figura 4.3 - Equipamento TGA METTLER modelo TG 50.....	35
Figura 4.4 - Corpos de prova confeccionados. Corpo de prova preparado com argamassa convencional (a) e de corpo de prova preparado com a argamassa de estudo (b).....	37
Figura 4.5 - Método para determinação da retenção de água, segundo NBR 13277.....	39
Figura 4.6 – Prensa de ensaios mecânicos utilizada neste trabalho.....	40
Figura 4.7 - Rompimento do corpo de prova no ensaio à compressão.....	40
Figura 4.8 - Corpos de prova em ensaios de absorção de água por imersão.....	41
Figura 4.9 - Microscópio óptico utilizado neste trabalho.....	45



Figura 5.1 - Análise termogravimétrica da escória, granito e ardósia.....	48
Figura 5.2 - Análise termogravimétrica dos compósitos escória/granito e escória/ardósia.....	49
Figura 5.3 - Análise termogravimétrica do compósito de escória/granito para várias concentrações de escória.....	51
Figura 5.4 - Gráfico Absorção por capilaridade x (tempo de absorção) <sup>1/2</sup> para argamassa produzida com escória/granito com 28 dias.....	57
Figura 5.5 - Painel revestido com argamassa convencional.....	60
Figura 5.6 - Painel revestido com argamassa produzida com escória/granito.....	60
Figura 5.7 - Amostras usadas para análise de imagem em microscopia óptica. Argamassa convencional (a) e argamassa produzida com escória granito (b).....	62
Figura 5.8 - Microscopia óptica da amostra de argamassa convencional. Aumento 50 vezes.....	63
Figura 5.9 - Microscopia óptica da amostra de argamassa produzida com escória/granito. Aumento 50 vezes.....	63

**Lista de tabelas**

---

Tabela 4.1 - Composições das amostras obtidas para análise térmica.....	34
Tabela 4.2 - Composições (em volume) das argamassas obtidas neste trabalho.....	36
Tabela 5.1 – Composição química percentual da escória. Dados fornecidos pela Fundição Vieira LTDA.....	50
Tabela 5.2 - Resultados médios do limite resistência à compressão axial (MPa)....	53
Tabela 5.3 - Resistência à compressão (MPa) de acordo com a norma NBR 13281.....	54
Tabela 5.4 - Percentual da absorção de água por imersão.....	55
Tabela 5.5 - Coeficientes de absorção por capilaridade Coeficiente de capilaridade [(kg/m <sup>2</sup> )/min <sup>1/2</sup> ].....	58
Tabela 5.6 - Classificação dos coeficientes de capilaridade segundo NBR 13281 (ABNT,2005).....	58
Tabela 5.7 - Resultados da contagem e medida do comprimento linear total (em cm) por área (em m <sup>2</sup> ) das fissuras visíveis nos revestimentos de argamassas.....	61

## **Lista de Abreviaturas**

---

ABIFA – Associação Brasileira de Fundição

SIFUMG – Sindicato das Indústrias de Fundição de Minas Gerais

RAIS – Relação Anual de Informações Sociais

ASTM – American Society Testing Materials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

TGA – Análise Termogravimétrica

## Resumo

---

É notória a importância da região centro-oeste de Minas na indústria de fundidos e extração de pedras ornamentais, pois nessa região se concentra um grande número de indústrias de fundição e empresas do setor de pedras ornamentais. Essas indústrias geram uma quantidade significativa de resíduos sólidos. Na maioria das vezes esses resíduos são depositados na própria empresa ou destinados a aplicações que não agregam nenhum valor aos mesmos, como em base para pavimentação. Visando buscar uma alternativa viável para o melhor aproveitamento dos resíduos sólidos gerados por essas empresas nesta região este trabalho tem alguns objetivos a serem alcançados. Neste sentido, as propriedades de uma argamassa produzida a partir do compósito escória/granito em substituição a cal hidratada, são apresentadas. A argamassa produzida foi analisada através de ensaios de resistência à compressão axial, absorção de água e avaliação de fissuração comparando-se com uma argamassa convencional. A argamassa produzida com escória/granito apresentou melhores resultados com relação à impermeabilidade e acabamento quando comparada à argamassa convencional. No entanto, a resistência à compressão axial ainda é menor que a argamassa convencional, resultado do baixo poder aglomerante da escória.

**Palavras-chave:** Resíduos sólidos, escória, granito, argamassa.

## Abstract

---

The west-center region from Minas Gerais, is well-known for its significance on casting industries and ornamental-stone extraction duties; due to the fact that there are a large number of these industrials segments that concentrate in the area. Those industries generate a significant amount of solid residues, in most case those ones are stored in the proper companies, where they have been generated or even took to a worthless aggregated, as a pavement base for example. In order to achieve some objectives, this research is being done with specific aim to get the viable alternative for the suitable exploitation of the solid residues came from those industries. So, taking directions, the properties of a mortar produced from the slag/granite composite instead the whitewash, are presented. The produced mortar had been analyzed by assays of axial compressive strength, water absorption and the evaluation of making fissures, then comparing it to the conventional mortar. The mortar produced with slag/granite had presented such impermeability also the finishing better than the conventional mortar. However, the compressive strength is still minor than the conventional mortar, this is explained of the result of the low agglomerative power of the residue slag.

**Keywords:** solid residues, slag, granite, mortars.

## Capítulo 1 - Introdução

---

### 1.1 - Considerações iniciais

Neste capítulo, serão abordados os principais aspectos deste trabalho e apresentados os motivos que levaram à escolha do tema.

### 1.2 - Justificativa do tema

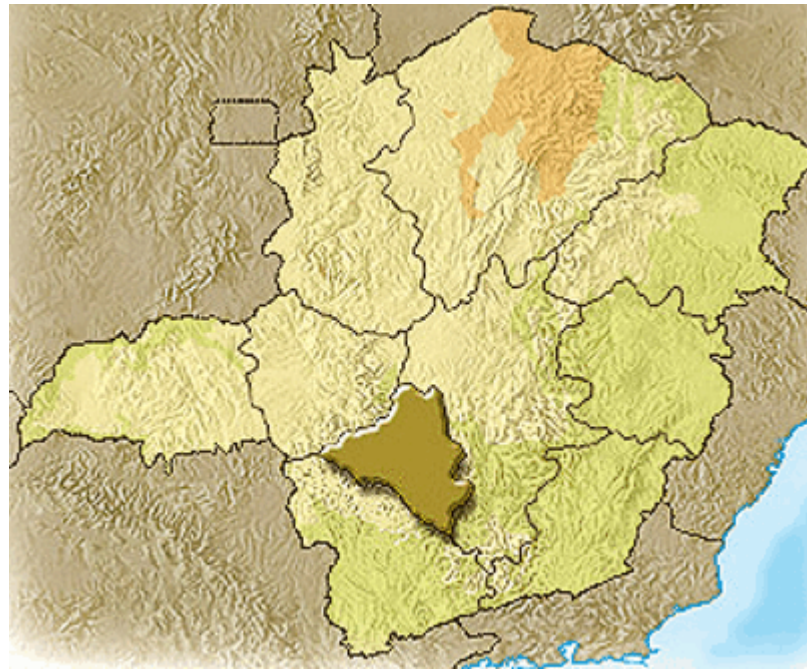
O processo produtivo em qualquer âmbito industrial gera uma quantidade muito grande de resíduos, tanto na produção de bens duráveis como não duráveis. Todo resíduo descartado de forma descontrolada passou a ser um problema sério uma vez que ocupam grandes áreas, tornando-as “ociosas”. Normalmente, as soluções encontradas pelas empresas quanto ao descarte de tais resíduos são os aterros e lixões; porém, na estrutura das grandes cidades, não há espaços para essas obras devido à aglomeração de pessoas nos centros urbanos e à alta valorização dos terrenos em algumas áreas.

A questão do desperdício também é relevante, pois, à medida que se descarta um resíduo industrial, acaba se perdendo um material que poderia ser reciclado e, desta forma, gerar outros bens de produção.

Outro fator importante é o problema da contaminação e degradação do meio ambiente em função da natureza dos resíduos, em especial os resíduos sólidos. Estes podem gerar danos na atmosfera, solo, lençol freático e rios, durante todo seu ciclo de vida, seja nas dependências da empresa e, principalmente, em sua etapa de destinação final, a qual normalmente é externa à empresa. Resíduos como os rejeitos de produtos

químicos, subprodutos sólidos da indústria siderúrgica, resíduo do corte de pedras ornamentais, resíduos de demolições entre outros se enquadram nesta situação [1].

Dentre os resíduos citados destacam-se os provenientes da indústria siderúrgica e do corte de pedra ornamental devido à grande quantidade gerada. Estes resíduos são encontrados em abundância na região centro-oeste de Minas Gerais e não encontram uma destinação final adequada. A Figura 1.1 mostra o mapa do estado de Minas Gerais com destaque para a região centro-oeste do estado. Na Figura 1.2 são mostradas as cidades do centro oeste mineiro que possuem um número considerável de empresas.



**Figura 1.1** - Mapa do estado de Minas Gerais com destaque para a região centro-oeste [2].



**Figura 1.2** - Principais cidades do centro oeste mineiro com destaque para Divinópolis, Itaúna e Cláudio, cidades com grande número de indústrias [3].

Neste contexto o presente trabalho visa contribuir para o reaproveitamento dos resíduos gerados nesta região. Porém, para se viabilizar a utilização de um resíduo, principalmente na construção civil, é necessário superar alguns desafios, já que esse setor, que absorve tantos materiais, também exige muitos padrões de qualidade. Esses padrões tornam ainda mais difícil a reciclagem de alguns resíduos, pois a maioria dos resíduos é obtida sem que haja um padrão ou qualquer critério. A grande maioria dos resíduos é obtida de qualquer maneira e depositada nos pátios da empresa, até o descarte final. Essa falta de critério pode influenciar na composição química e também em algumas características que podem ser importante para se reciclar o resíduo.



### 1.3 - Desafios da reciclagem

Para encontrar novos materiais alternativos, principalmente para aplicação na construção civil, universidades, empresas do setor privado e associações têm trabalhado de forma insistente e laboriosa, através de muitas pesquisas. Características como resistência, durabilidade, trabalhabilidade e absorção são condições essenciais para aceitação de novos produtos na indústria da construção civil [4]. Além desses fatores, para que o novo material seja utilizado o seu custo final deve ser competitivo com o custo de materiais usuais. Esses são alguns dos desafios encontrados no caminho de quem investe em pesquisas para se reciclar algum material. Como a princípio existe uma infinidade de possibilidades para a utilização de um resíduo é indicado que se trabalhe seguindo alguns parâmetros já estabelecidos, buscando alternativas já estudadas. No intuito de superar essas dificuldades se faz necessário seguir algumas etapas no processo de reciclagem, descritas a seguir e resumidas no fluxograma da Figura 1.3 [4].

A etapa 1 consiste em identificar todas as questões relevantes a serem consideradas durante o estudo. A partir de aspectos técnicos, ambientais e econômicos, a equipe deve ser capaz de identificar os requisitos associados ao uso do material em uma aplicação específica. Durante esta fase de planejamento, deve ser dada ênfase à revisão bibliográfica sobre o assunto, buscando-se analisar os dados existentes, incluindo estudos prévios, ensaios de laboratório e de campo, e histórico de desempenho de projetos anteriores que tenham empregado o material.

Uma vez que as questões a serem consideradas estejam determinadas, na etapa 2 deve-se estabelecer quais ensaios serão realizados e quais critérios serão adotados para resolver estas questões. Ressalta-se que a maioria dos métodos de ensaio normalizados foram desenvolvidos para avaliar materiais convencionais, e quando a utilização de um

material não-convencional (e particularmente de um resíduo) está sendo estudada, podem ser necessárias modificações nos ensaios ou até mesmo o desenvolvimento de novos métodos de ensaio.

A etapa 3 consiste no desenvolvimento e realização dos ensaios, a fim de verificar se o material ou produto irá satisfazer aos padrões pré-estabelecidos para aquela determinada aplicação. No caso dos resultados não serem satisfatórios, deve-se considerar a possibilidade de alterar o material em estudo (através de algum processamento adicional ou alternativo), ou modificar o produto final, para atingir os resultados desejados, conforme representado na etapa 4. Em caso afirmativo, ou seja, se for possível modificar favoravelmente as características do material ou produto, deve-se realizar novamente os procedimentos descritos na etapa 3.

Caso os resultados dos ensaios sejam satisfatórios, e mesmo que todos os requisitos específicos associados ao uso do material em uma dada aplicação sejam atendidos, ainda existem alguns aspectos subjetivos e não-técnicos que podem vir a impedir ou limitar a implementação do uso do material avaliado. Estes aspectos, que se referem à aceitação do novo material pelos órgãos políticos e/ou reguladores, pelo meio técnico e pela opinião pública e mercado em geral, são tratados na etapa 5.

Ainda, como representam as etapas 6 e 7, antes da aceitação definitiva do material, podem ser necessários ainda ensaios em campo, a fim de resolver aspectos técnicos que não possam ser completamente avaliados por meio de ensaios de laboratório, através do monitoramento ao longo do tempo do uso do material em aplicações práticas [5]. Essa abordagem passa a ser ainda mais importante, pois contribui para que as empresas estejam de acordo com a política nacional do meio ambiente na questão da gestão de resíduos gerados.

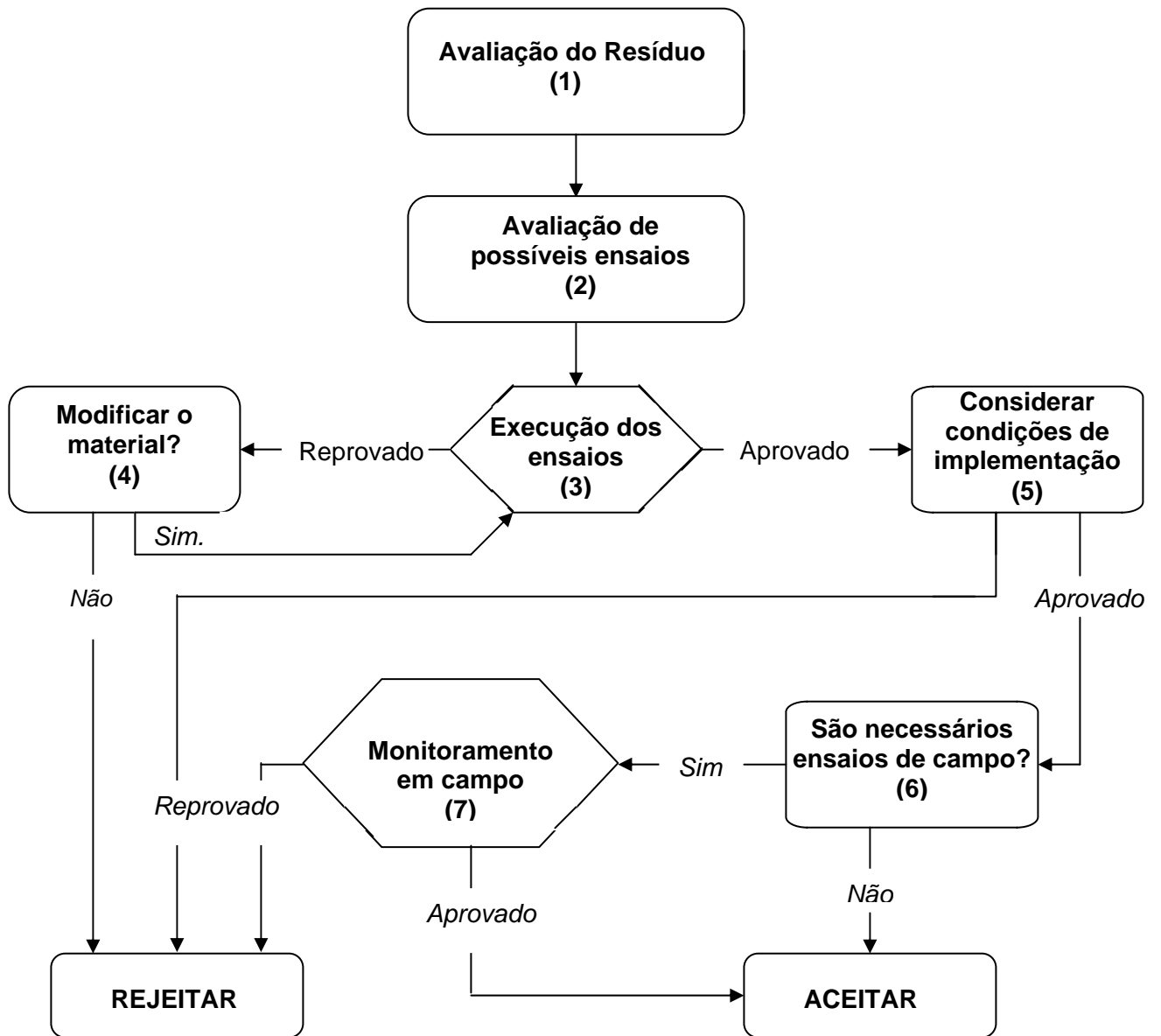


Figura 1.3 - Fluxograma das etapas do processo de reciclagem [4].

#### **1.4 - A legislação ambiental**

A legislação ambiental brasileira tem proposto leis que regem a questão dos resíduos. No caso dos resíduos sólidos já existem algumas leis que regulamentam esta questão. De acordo com a Lei 6.938/81, que institui a Política Nacional do Meio Ambiente, e a 9.605/98 [6,7], que trata dos crimes ambientais, a responsabilidade pela reparação de qualquer dano ambiental é objetiva e a responsabilidade é solidária, que significando que independentemente do fato gerador a empresa será chamada para remediar qualquer passivo gerado devida à má gestão de resíduos e que a responsabilidade da empresa não cessa quando os resíduos deixem suas instalações, perdurando durante o período que ele representar risco ambiental, incluindo sua destinação final.

Um adequado Sistema de Gestão de Resíduos para atender plenamente às diretrizes atuais de proteção ambiental e responsabilidade social deve ter por finalidade, em ordem decrescente de prioridade, a eliminação, minimização, reuso ou reciclagem dos resíduos. Esse nível de qualidade, embora possa parecer utópico para muitos, é perfeitamente possível de ser alcançado, desde que um projeto de gestão de resíduos objetivamente voltado para tal seja elaborado e implementado, principalmente quando efetuado desde o início, junto com o projeto do empreendimento. Essa é uma etapa que deve ser perseguida prioritariamente porque, além de propiciar um tratamento ambiental e socialmente amigável aos resíduos, na maioria das situações, acarreta um retorno competitivo para a organização, inclusive financeiro. Entretanto, sabemos muito bem, nem sempre é possível atingir esse padrão de gestão com todos os resíduos de um processo industrial. Portanto, empresas que quiserem continuar competindo no mercado, principalmente no caso das exportações onde as exigências são maiores, devem investir

em pesquisas sobre reciclagem de resíduos. No intuito de contribuir com essas pesquisas serão abordadas no próximo capítulo questões relevantes sobre o processo de reciclagem de escória de ferro e resíduo de corte das pedras ornamentais.

### 1.5 – Referências

- [1] Angulo, S.C.; Zordan, S.E.; John, V.M. *Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil*. in: 4º Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, São Paulo, 2001 p. 43 – 56.
- [2] <http://www.descubraminas.com.br>: Acesso em 15/06/2006.
- [3] <http://maps.google.com/>: Acesso em 15/06/2006.
- [4] Chesner, W.; Collins, R.; Mackay, M.; Emery, J. **User guidelines for waste byproduct material in pavement construction**. Disponível em: <http://www.tfhr.gov/hnr20/recycle/waste/begin.htm>. Acesso em 15/06/2006.
- [5] Mancio, M. *Contribuição ao estudo do fenômeno da Instabilidade Volumétrica das Escórias de Aciaria elétrica*. Rio Grande do Sul, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Escola de Engenharia, 2001 (Dissertação de Mestrado).

## Capítulo 2 – Revisão da Literatura

---

### 2.1 - Considerações iniciais

O processo de geração de resíduos sólidos é norteado por várias diretrizes da indústria de fundidos e da extração e beneficiamento de pedras ornamentais. Os aspectos relevantes referentes a esses temas são abordados neste capítulo.

### 2.2 - A indústria de fundidos

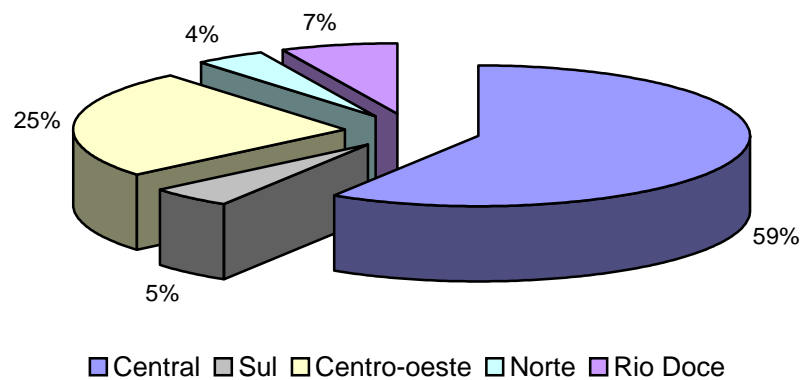
A redução dos minerais metálicos e a fusão dos metais obtidos foram tão marcantes na vida da humanidade que deram nome a dois períodos da nossa História. Aquele em que ocorreram a descoberta e o desenvolvimento da técnica da fusão do estanho com o cobre, entre 3500 e 1400 antes de Cristo, que ficou conhecido como Idade do Bronze e foi sucedido pela Idade do Ferro. Os primeiros produtos de ferro tinham baixa resistência à fratura, característica que, posteriormente, foi corrigida pelos hititas, introdutores do carvão ao ferro no processo de fusão [1].

O procedimento utilizado pela indústria de fundição, em sua essência, consiste na fusão de ferro, aço ou metais não-ferrosos; como cobre, zinco, alumínio e magnésio, visando obter certas propriedades para o produto final. Na forma líquida, os metais e suas ligas são vazados no interior de moldes confeccionados com areias especiais aglomeradas com resinas próprias para esse fim, com formatos que reproduzem o objeto pretendido.

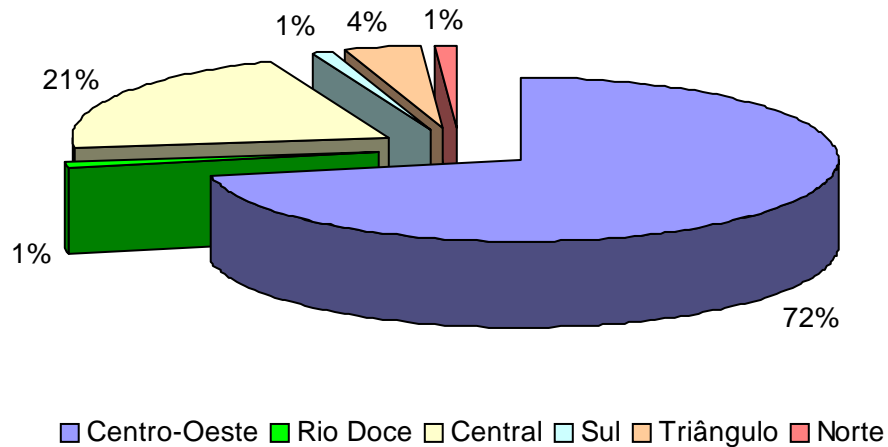
No Brasil, a ocorrência abundante de sucata e minerais, principalmente minério de ferro, além da disponibilidade energética e de insumos, como areia de fundição,

bentonitas, resinas, catalisadores e coque de babaçu, contribuíram decisivamente para a definição do parque industrial de fundição nos moldes e dimensões atuais.

A produção de fundidos no Brasil corresponde a 2,3% do total mundial. Segundo dados de 1999 o Brasil produziu 1.574.000 toneladas, sendo 87% de ferro fundido. Minas Gerais contribuiu com 38% do total produzido pelo Brasil. Em 1999 o índice médio de produtividade do setor de fundição no estado de Minas Gerais foi de 41,9 toneladas por hora ao ano. O Brasil exportou 249.000 toneladas em 1999 de fundidos, sendo 88% de ferro fundido. Minas Gerais contribuiu com 49% desse total. Em Minas Gerais, 86% da produção correspondem a ferro fundido, 6% aço e 8% alumínio. Daí o interesse em se estudar o reaproveitamento de escória de ferro fundido. As Figuras 2.1 e 2.2 mostram os percentuais da distribuição regional da produção de fundidos no estado de Minas Gerais e do número de empresas de fundição por região. [2].



**Figura 2.1** - Percentual da distribuição regional da produção de fundidos no estado de Minas Gerais [2]. Fonte ABIFA.



**Figura 2.1** - Percentual do número de empresas de fundição no estado de Minas Gerais por região [2]. Fonte ABIFA.

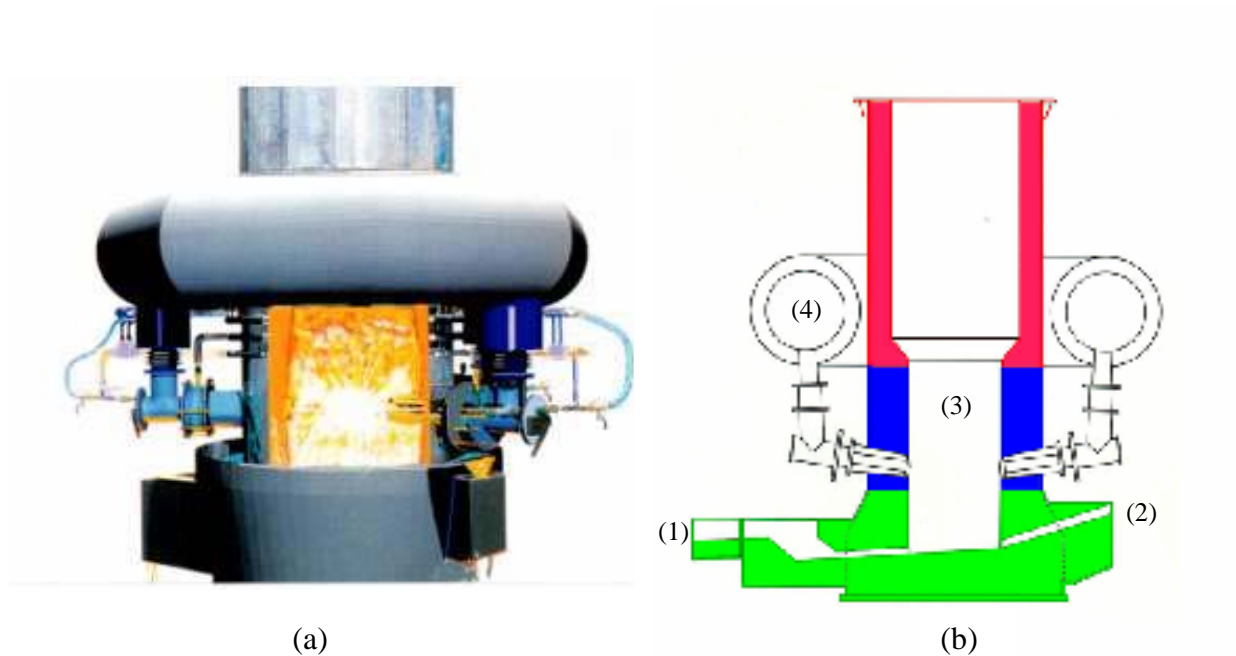
### 2.3 - A indústria de fundidos do centro-oeste de Minas

Localizadas no centro-oeste de Minas, uma região importante do estado, cidades como Divinópolis, Cláudio e Itaúna têm sua economia fortemente impulsionada pela indústria de fundidos. Como exemplo a cidade de Cláudio, que de acordo com dados da Relação Anual de Informações Sociais (RAIS) [3] de 2004, possui 57 indústrias de fundição, que são responsáveis pela geração de 2.030 empregos formais. Apesar de 72% das indústrias de fundição de Minas se localizarem na região centro-oeste, a produção de fundidos corresponde apenas a 25% da produção mineira. Estes dados levam à conclusão que a maioria das empresas é de pequeno porte e trabalham ainda de forma praticamente artesanal, uma vez que a região possui muitas indústrias e relativamente baixa produção.

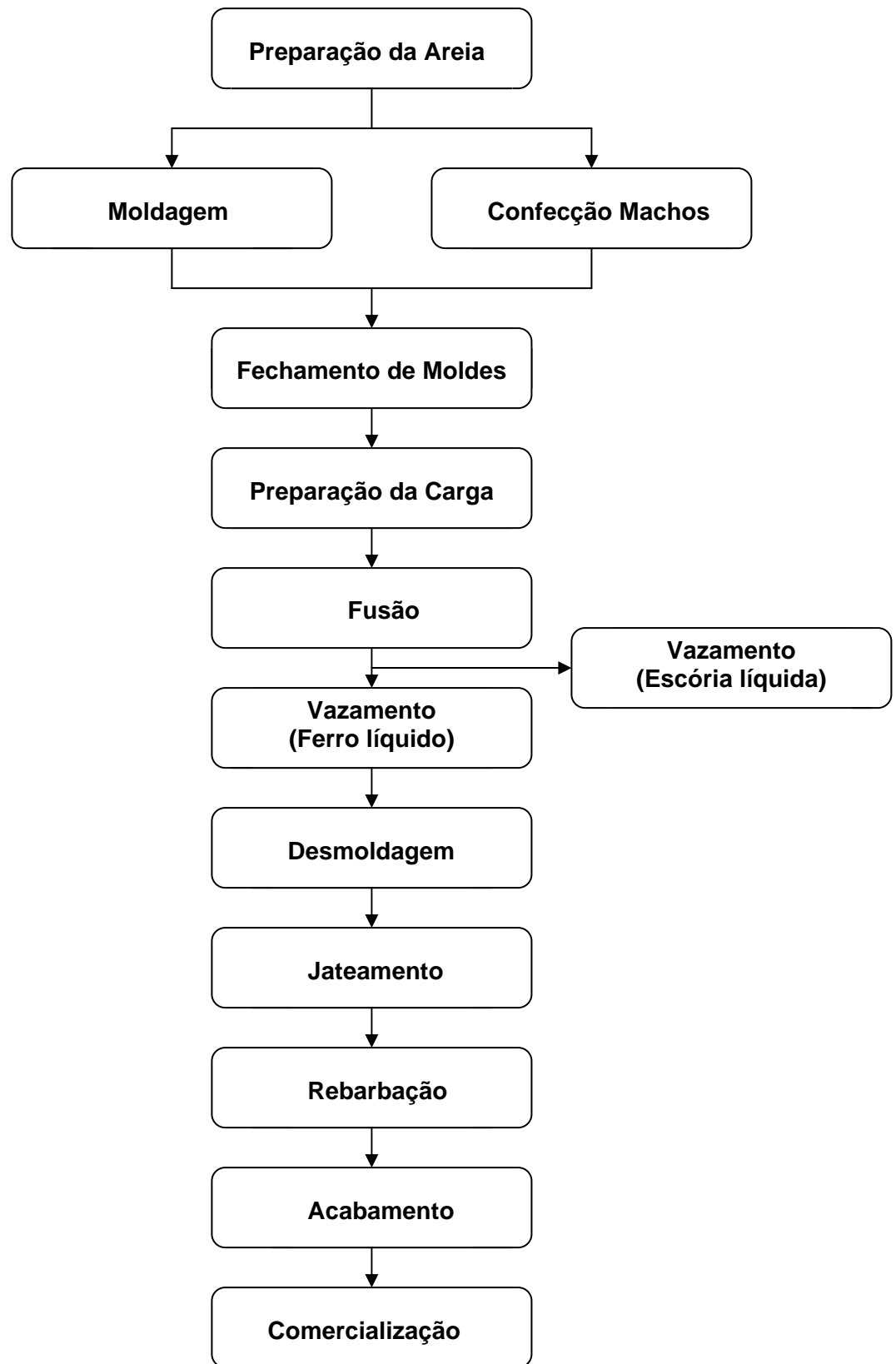


Muitas fundições utilizam o ferro fundido cinzento, pois é de fácil fusão e moldagem além de boa resistência mecânica e usinabilidade. Ferro fundido é uma liga de ferro/ carbono, cujo teor de carbono situa-se acima de 2%. Sua principal característica é a coloração escura. É obtido quando o material da primeira fusão (ferro gusa) obtido em alto forno é levado a uma fundição e refundido junto com a sucata de ferro fundido e aços em forno cubilô (Figura 2.3), dando origem ao ferro fundido de segunda fusão com 2,3 a 3,5% de carbono [4].

Grande parte das fundições do centro-oeste produz peças de ferro fundido através do processo ilustrado através do fluxograma mostrado na Figura. 2.4. Onde se podem ver todas as etapas, desde a moldagem da areia, vazão do ferro líquido, desmoldagem e acabamento para a comercialização.



**Figura 2.3** - Fotografia (a) e desenho esquemático (b) de forno tipo cubilô. Canal de vazamento de ferro líquido (1), canal de vazamento de escória (2), interior do forno (3), sistema de refrigeração (4).



**Figura 2.4** - Fluxograma representativo do processo de obtenção de peças fundidas.

Através do processo mostrado no fluxograma da Figura 2.4 são fabricadas peças de ferro fundido cinzento, geralmente utilizado quando se produz peças de forma complexa ou quando se quer peças de baixo custo de produção, como carcaças de motor, painelas, lareiras, fogões industriais [5].

Durante o processo citado anteriormente, ainda ocorre o vazamento de escória líquida por um canal na parte inferior do forno a uma temperatura de aproximadamente 1500 °C (Figura 2.5). A quantidade de escória gerada é de aproximadamente 120 kg por tonelada de ferro [6]. A maioria dessas fundições não possui tanques para deposição da escória, por isso ela é depositada em fossos ao ar livre até se solidificar. O principal destino da escória cristalizada do centro-oeste é o cascalhamento de vias rurais, portanto sem nenhum valor agregado.



**Figura 2.5** - Vazamento de escória líquida em um forno tipo cubilô.

## 2.4 - A Escória

A escória pode ser definida como “Um produto não-metálico constituído essencialmente de silicato de cálcio e outras bases que se desenvolve no forno durante o processo de fusão do ferro” [7]. A Figura 2.6 apresenta uma imagem da escória cristalizada na forma de pedra bruta.



**Figura 2.6** - Escória cristalizada na forma de pedra bruta.

Os princípios constituintes da escória de ferro são: silício ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ), que representam 95% da composição desse material. Elementos secundários como óxidos de manganês e ferro também fazem parte da composição.

As características físicas como densidade, porosidade e tamanho da partícula dependem do tipo de resfriamento da escória e de sua composição química [7]. Outro fator importante é o poder aglomerante da escória, que depende da relação entre a quantidade dos compostos  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$  presentes na escória [3]. Este poder aglomerante é definido como reatividade hidráulica.

Segundo Samet [8] esta reatividade hidráulica depende da composição química, fase vítrea do resíduo e da granulometria do grão da escória. Este índice de hidraulicidade ou módulo de basicidade pode ser calculado da seguinte forma [9]:

$$F1 = \text{CaO} / \text{SiO}_2 \quad (2.1)$$

Se  $F1 < 1$ , a escória é considerada ácida e sua hidraulicidade é baixa.

Se  $F1 > 1$ , a escória é considerada básica e sua hidraulicidade é boa.

Neste caso, pode-se ter os seguintes tipos de escória:

- **Escória granulada:** é obtida através do processo, onde a escória é resfriada de forma rápida através de jato d'água. Nesse processo não há tempo para cristalização do material.
- **Escória pelotizada:** é obtida quando a escória cai dentro de uma roda dentada onde também é submetida a um jato d'água, que arremessa a escória em grãos para o ar.
- **Escória cristalizada:** é o tipo de escória que é obtida pelo processo mais simples, ela escorre por um canal no alto forno e então se resfria naturalmente de forma lenta até cristalizar por completo, originando-se uma pedra bruta e maciça.

Cada tipo de escória gerada encontra um destino específico. No próximo tópico são relatados tais destinos e algumas aplicações desse resíduo.

#### **2.4.1 Histórico da reciclagem de escória de ferro.**

Há séculos, o homem vem pesquisando e utilizando a escória de ferro. Já no século 350 depois de Cristo, o Filósofo grego Aristóteles receitava escória para curar feridas [5]. A escória tem sido usada para construções de estradas desde os tempos romanos [10].

Porém, com o advento da revolução industrial e a grande expansão europeia, as indústrias passaram a produzir mais, gerando grandes quantidades de escória. A partir do início do século XXI, com o avanço das pesquisas e a descoberta de novas utilizações para a escória, como agregado para concreto e principalmente na produção de cimento, a escória passa a ser chamada de subproduto e não mais resíduo.

Em 1862 Eugene Langen, na cidade de Trisdorf, pesquisou sobre a escória granulada e demonstrou através de seus ensaios que escória básica moída misturada com cal hidratada poderia ser utilizada na produção de argamassa e as características dessa mistura superavam os sistemas que só utilizavam cal como ligante [11].

Nos Estados Unidos, uma grande parte da escória era utilizada na construção de lastro de via Férrea, porém, como na Europa, a escória passou a ganhar novas aplicações e começou a ser comercializada na década de 40. Surgia assim a “National Slag Association”, que, desde então, fornece dados estimativos sobre esse subproduto.

Em 1939 foram utilizados 8,3 milhões de toneladas avaliados em 16,4 milhões de dólares, atualmente, houve uma valorização do subproduto, pois em 2000 foram utilizados 8,9 milhões de toneladas avaliados em 58,3 milhões de dólares [7]. Para o

futuro o que se espera com o aumento das pesquisas é que se encontre nova utilização para a escória de alto forno e que cada vez seja agregado valor à sua comercialização.

#### **2.4.2 - Reciclagem atual de escória de ferro no mundo**

Atualmente há uma crescente preocupação com a questão ambiental. Países desenvolvidos têm buscado cumprir metas e encontrar novas alternativas para preservar o meio ambiente e minimizar o problema. Muitos países têm incentivado pesquisas sobre reciclagem, pois com isso evitam a construção de aterros e a poluição de rios e nascentes. Observa-se também a mesma preocupação com a escória de ferro, uma vez que muitos países investem em pesquisas para solucionar o problema e encontrar alternativas viáveis para sua utilização [12].

Na Inglaterra e Canadá já se produz comercialmente agregados leves a partir de pelotização da escória líquida e em algumas regiões da Europa usa-se escória ativada com cal para a produção de blocos e lajotas [6]

Nos Estados Unidos, a maior parte da escória gerada é do tipo cristalizada e em grande parte é utilizada como base para pavimentação, mas ainda se destaca a utilização do resíduo como agregado concreto para asfalto, produtos de concreto, agregados graúdos para concreto, enchimento, lastro de via férrea e cobertura de solo, funcionando como adubo para melhorar as condições de solo.

Também se utiliza a escória para a produção de lã mineral: material usado como isolante térmico e também como proteção contra chamas, além de isolante acústico [7].

No Egito, há muito tempo se produz cimento utilizando a escória granulada, porém, outros tipos de escória como a cristalizada é praticamente ignorada devido à sua baixa reatividade hidráulica e, em consequência disso, pouco desse material é utilizado e

seu uso é limitado a aplicações de baixo valor [13]. Porém, nem mesmo a escória granulada é usada, sendo que grande parte ainda é descartada em aterros o que causa problemas ao meio ambiente [12].

Alguns autores como Mustafa [14] sugerem a utilização da escória cristalizada na produção de autoclaves (aparelhos para desinfecção) ou tijolos, pois é uma alternativa economicamente viável e pode ser desenvolvida em países subdesenvolvidos por requerer uma tecnologia muito pequena.

Na Tunísia há estudos recentes sobre a escória com o objetivo principal de substituir o clínquer parcialmente na fabricação de cimento [8].

No Japão há estudos onde se procura substituir a areia natural por escória granulada, pois em algumas partes do país a escavação de areia já é proibida. A areia-S como é chamada tem vários pontos positivos como: compatibilidade com os padrões internacionais, não contém substâncias que afetam a sua durabilidade do concreto e depois de alguns dias a resistência à compressão equivale a areia natural. Essa areia é obtida quando se adiciona algum elemento à escória granulada moída [15].

#### **2.4.3 - Reciclagem de escória de ferro no Brasil**

Visando valorizar economicamente seus resíduos, agregando valor e aumentando o mercado consumidor, a indústria siderúrgica brasileira já considera o foco ambiental como parte de sua estratégia de mercado, buscando novas tecnologias de reciclagem e investindo em pesquisas que busquem alternativas viáveis de reutilização para seus resíduos.

No Brasil, a maior quantidade de escória gerada é do tipo granulada, que é consumida em grande parte pela Indústria Cimenteira. Segundo Cyro Takano et. al [16]



essa utilização representou 63% da escória de alto forno gerada no país no ano 2000. Com exceção das Indústrias Cimenteiras, a reciclagem de resíduos sólidos ainda é tímida no Brasil quando comparada com a praticada em países desenvolvidos [17]. Porém, ainda se acumulam muito desta escória em aterros.

A escória pelotizada, que pode ser moída e misturada diretamente na betoneira ou utilizada como agregado leve, praticamente não é encontrado no mercado brasileiro.

No que se refere à escória cristalizada, a maioria é descartada em aterros e a pequena parte utilizada não possui nenhum valor agregado, pois seu principal uso é em base para pavimentação [6].

Em menor escala, alguns estudos recentes indicam sua utilização como agregado graúdo para concreto. Em sua pesquisa, Arrivabene et al demonstram que pode ser viável substituir a brita comum por escória de alto forno cristalizada britada [18].

Segundo Francis [12], pouco se pesquisa no Brasil sobre o processo de conversão da escória em materiais vitro-cerâmicos, o que seria uma boa alternativa para utilização do resíduo, pois o Brasil produz grande quantidade de escória de alto forno e esse processo de conversão é bem sucedido em outros países. Esta escória vitro-cerâmica pode ser usada com sucesso em várias aplicações, inclusive na indústria de construção civil, pois possui boas propriedades como boa dureza e resistência ao desgaste.

Outro resíduo igualmente importante é o que é gerado durante o desdobraimento de pedras ornamentais, que será abordado adiante.

## **2.5 - Pedras ornamentais**

As rochas ornamentais são materiais naturais que agregam valor principalmente através de suas características estéticas, destacando-se pelo padrão cromático, textura e granulação, além da beleza. No tocante a classificação comercial, os tipos de rochas ornamentais são os granitos e mármore. Outros tipos rochosos também incluídos no campo das rochas ornamentais são os arenitos, conglomerados e ardósia.

O Brasil possui em seu território grandes jazidas de pedras ornamentais de revestimento com os mais variados aspectos estéticos. Esse tipo de pedra compete com pisos e revestimentos cerâmicos devido à suas características. Os principais estados produtores são ES, PB, MG, BA, CE, SP e RJ [19]. A maior jazida de ardósia do mundo se localiza na região centro-oeste de Minas e o principal produtor de mármore é estado do Espírito Santo.

A seguir são apresentadas, de modo simplificado, as principais características desses materiais:

### **2.5.1 - Os granitos**

Para o setor de pedras ornamentais o termo granito designa um amplo conjunto de rochas cuja sua mineralogia principal é à base de quartzo e feldspato. As cores dessas rochas são fundamentalmente determinadas pelos constituintes mineralógicos.

### **2.5.2 - Mármore**

São classificadas como mármore todas as rochas carbonáticas capazes de receber polimento. A composição mineralógica principal depende da composição química do sedimento e do grau metamórfico, sua mineralogia principal é a calcita e a dolomita. Sua

estrutura é maciça e foliada. Possuem uma variedade de cores e texturas o que as tornam bastante rentáveis na indústria de pedras ornamentais.

A principal diferença entre mármore e granito, é a sua dureza uma vez que o mármore pode ser riscado por objetos cortantes, e o granito não. Os blocos de mármore e granito são extraídos de rochas inteiras como mostra a Figura 2.7.



(a)



(b)

**Figura 2.7** - Extração de granito (a) e mármore (b)

### 2.5.3 - Ardósia

São rochas de metamorfismo regional ou de carga. Sua composição química é aluminosa, sílico-aluminosa e sílico-aluminosa-carbonática. Sua estrutura é de clivagem ardósiana e deslocamento planar. Tem ampla utilização comercial como piso na indústria ornamental. A Figura 2.8 mostra a extração e o descolamento das chapas de ardósia.



**Figura 2.8** - Extração (a) e descolamento das chapas de ardósia (b).

Para se comercializar essas pedras é necessário o seu beneficiamento. Durante esse processo, a quantidade de resíduo gerado é muito grande, por isso é importante que se busquem alternativas para se reciclar esse resíduo.

### 2.6 - Reciclagem de corte de mármore, granito e ardósia

Durante o processo de desdobramento dos blocos de granito, quando se faz a serragem e o polimento, há uma geração significativa de resíduos. Autores como Freire e

Motta [20] estimam que em serradas onde se produz chapas de 2 cm de espessura, 20% a 25% do bloco é transformado em pó. No Brasil existem muitas empresas de beneficiamento de mármore, portanto estima-se que a quantidade de resíduo gerado com o corte de mármore e granito seja de 240.000 Ton/ano [21]. Devido a essa grande quantidade de resíduo gerado, novas aplicações para o resíduo, principalmente na construção civil, tendo sido objetivo de algumas pesquisas como o aproveitamento do resíduo do corte de mármore na produção de argamassas [22], blocos e revestimentos cerâmicos [22], tijolos de solo cimento [23] além de confecção de lajotas para piso [21] e aditivo na fabricação de produtos cerâmicos [23].

A quantidade de resíduo do corte de pedra ardósia gerado no Brasil é pouco significativa, por isso há pouco estudo sobre o assunto. Como exemplo pode-se citar o estudo do seu aproveitamento na produção de tijolos [24].

Como já relatado, neste trabalho será estudada a viabilidade da utilização conjunta do compósito escória/granito como aditivo na produção de argamassa. Neste sentido, faz-se necessário conhecer as propriedades fundamentais desse produto na construção civil.

## **2.7 - Argamassa**

A argamassa é uma mistura de cimento, areia, água e, em alguns casos, de um outro material (cal, saibro, barro, caulim, etc.). Cimento é um pó fino que, em contato com a água, tem a propriedade de unir firmemente, como uma cola diversos tipos de materiais de construção. No mercado existem muitos tipos de cimento. A diferença entre eles está na composição, mas todos atendem às exigências das Normas Técnicas Brasileiras. A areia deve ter grãos duros e precisa estar limpa, livre de torrões de barro,

galhos, folhas e raízes antes de ser usada. A água a ser utilizada deve, também, ser limpa sem barro, óleo, galhos, folhas e raízes.

Quanto maior a plasticidade das argamassas na hora do uso, maior será a sua aderência, o que é uma grande vantagem em certas aplicações. Para aumentar a plasticidade é adicionado um quarto componente à mistura, que pode ser cal, saibro, barro, caulim ou outros, dependendo da disponibilidade e uso na região [25].

De todos esses materiais, chamados de plastificantes, o mais recomendado é a cal, também conhecida como cal hidratada, cuja fabricação e uso, modernamente são regidos por Normas Técnicas em cada país. Assim como o concreto, as argamassas também se apresentam moles nas primeiras horas de confecção, e endurecem com o tempo, ganhando elevada resistência e durabilidade. São empregadas com as seguintes finalidades: assentar tijolos, blocos, azulejos, ladrilhos, cerâmicas e tacos de madeira; impermeabilizar superfícies; regularizar (tapar buracos, eliminar ondulações, nivelar e aprumar) paredes, pisos e tetos; dar acabamento às superfícies (liso, áspero, rugoso, texturizado, etc.).

### **2.7.1 - Tipos de Argamassa**

As argamassas são classificadas, segundo a sua finalidade, em argamassas para assentamento e argamassas para revestimento.

As argamassas para assentamento são usadas para unir blocos ou tijolos das alvenarias. Servem também para a colocação de azulejos, tacos, ladrilhos e cerâmica.

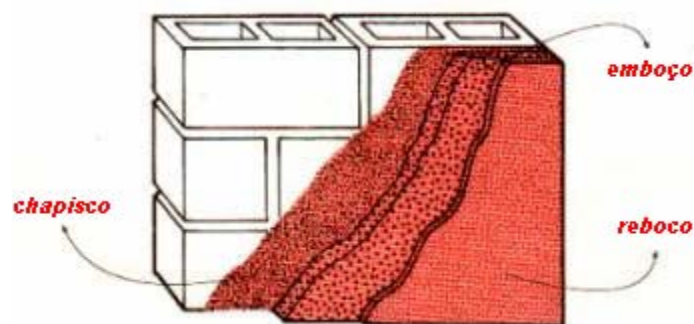
A principal finalidade da argamassa de revestimento é regularizar as superfícies de paredes e também de tetos, muros e fachadas, resguardando-as dos intempéries e do

desgaste de maneira geral. Como qualidades essenciais de um revestimento podem ser citadas a resistência ao choque, a esforços de abrasão, a durabilidade e a impermeabilidade, quando necessária [26].

As três primeiras fiadas de uma parede de blocos ou tijolos devem ser revestidas inicialmente com uma camada de argamassa de impermeabilização, que protege a parede contra a penetração da umidade.

As superfícies das paredes e tetos devem receber uma camada de chapisco, qualquer que seja o acabamento. Sem o chapisco, que é a base do revestimento, as outras camadas podem descolar e até cair. Em alguns casos, como em muros, esse pode ser o único revestimento.

Sobre o chapisco é aplicada uma camada de massa grossa ou emboço, para regularizar a superfície. Por último, vai a massa fina ou o reboco, que dá o acabamento final (Figura 2.9). Em alguns casos não é usado o reboco, por motivo de economia.



**Figura 2.9** - Camadas de acabamento de uma parede de tijolos.

Azulejos, ladrilhos e cerâmicas são aplicados sobre o emboço. O acabamento de paredes mais econômico é o cimentado liso, aplicado diretamente sobre o chapisco.

O chapisco, o reboco e o emboço não são usados em pisos. O cimentado é o piso de argamassa mais econômico. Se a superfície for muito irregular, convém aplicar inicialmente uma camada de argamassa de regularização ou nivelamento. No Brasil, a maioria das residências utiliza apenas o emboço como última camada de revestimento. Desta forma é importante o estudo de suas características.

### **2.7.2 - Emboço**

Emboço é uma camada intermediária de revestimento com acabamento áspero com espessura entre 1 e 2 cm, que é aplicada após o endurecimento total do chapisco. A técnica de aplicação consiste no espalhamento com colher de pedreiro e regularização com régua e desempenadeira. Os grãos do agregado da argamassa são médios (0,42 - 2,00 mm) e o traço mais comum utilizado é 1:2:8 (cimento, cal, areia) em volume.

### **2.8. – Considerações Finais**

A crescente geração de resíduos sólidos anteriormente descritos, principalmente na região centro-oeste de Minas e o incipiente interesse na reciclagem por parte das indústrias dessa região, evidencia a necessidade de novas investigações acerca da viabilidade do reaproveitamento da escória cristalizada e do resíduo do corte de mármore e granito para a produção de produtos na construção civil. Diante das questões abordadas até o presente momento, afiguram-se no próximo capítulo os objetivos deste trabalho.



## 2.9. – Referências

- [1] Navarro, R.F. **A evolução dos materiais. Parte1: da pré-história ao início da era moderna.** *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 1 (1), p. 01-11, 2006.
- [2] SIFUMG – Sindicato das Indústrias de Fundição de Minas Gerais. Perfil Setorial 1999. Disponível em: [www.indi.mg.gov.br/publicacoes/perfil\\_fundicao\\_2000.pdf](http://www.indi.mg.gov.br/publicacoes/perfil_fundicao_2000.pdf). Acesso em 15/08/2006.
- [3] **RAIS 2004** - Relação Anual de Informações Sociais. Disponível em: [www.rais.gov.br/](http://www.rais.gov.br/). Acesso em 10/03/2006.
- [4] Romeiro, S.B.B. **Química na Siderurgia.** Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Instituto de Química, 1997 (Monografia de Especialização).
- [5] **Estudos de Caso sobre a Usinabilidade do Ferro Fundido - Parte 1**, G.M. Goodrich, *MODERN CASTING*, Maio 1997, p. 30-33.
- [6] Agopyan, V.; Jonh, V.M.; **Reciclagem de escória de alto forno no Brasil.** In: Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais, São Paulo-SP, 2000.
- [7] Kalyoncu, R.S. **Slag –Iron and steel.** U.S. Geological Survey Minerals Yearbook-2000. Disponível em: [http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron\\_&\\_steel\\_slag/790400.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_&_steel_slag/790400.pdf). Acesso em: 15/03/2006.
- [8] Samet, B.; Chaabouni, M., **Characterization of the Tunisian Blast-furnace slag and its application in the formulation of a cement**, *Cement and ConcreteResearch*, 34, p. 1153-1159, 2004.
- [9] Nkinamubanzi, P.C.; Aitcin, P.C.; **L’ utilization du laitier dans and la fabrication du ciment et du béton**, *Ciment Bétons Plâtres Chaux* 843 (2), p. 116-125, 2000.

- [10] Kalyoncu, R.S. **Slag-Iron and steel**. U.S. Geological Survey Minerals Yearbook-1996. Disponível em: [http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron\\_&\\_steel\\_slag/790496.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_&_steel_slag/790496.pdf). Acesso em: 15/03/2006.
- [11] Lima, L. A. **Hormigones com escorias de horno eléctrico comoáridos: propiedades, durabilidade y comportamiento ambiental**. Barcelona, Colegio de Ingenieros de Caminos - Escuela Técnica Superior de Caminos, 1999 (Tese de Doutorado).
- [12] Francis, A.A. **Conversion of blast furnace slag into new glass-ceramic material**. *Journal of the European Ceramic Society*, 24 (9), p.2819-2824, 2004.
- [13] Mostafa, N.Y.; El-Hemaly, S.A.S.; Al-Wakeel, E.I.; El-Korashy, S.A.; Brown, P.W. **Characterization and evaluation of the hydraulic activity of water-cooled slag and air-cooled slag**, *Cement and ConcreteResearch*, 31, p. 899-904, 2001.
- [14] Mostafa, N.Y.; El-Hemaly, S.A.S.; Al-Wakeel, E.I.; El-Korashy, S.A.; Brown, P.W. **Hidraulic activity of water-cooled slag and air-cooled slag at different temperatures**, *Cement and ConcreteResearch*, 31, p. 475-484, 2001.
- [15] Takahashi, T.; Yabuta, K. **New applications for iron and steelmaking slag**. *NKK technical review* 87, p. 38-44, 2002.
- [16] **Reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos**. Disponível em [www.poli.usp.br/Organizacao/Departamentos/shownamedoc.asp?codpes=80042](http://www.poli.usp.br/Organizacao/Departamentos/shownamedoc.asp?codpes=80042). Acesso em 15/03/2006.
- [17] Angulo, S.C.; Zordan, S.E.; John, V.M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. in: 4º Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, São Paulo, 2001.

- [18] Arrivabene, L.F. et. al. **Escória Bruta e Granulada de Alto Forno em Concretos**. Disponível em: [www.ibracon.org.br/lojavirtual/detalhe.php?detail=159](http://www.ibracon.org.br/lojavirtual/detalhe.php?detail=159). Acesso em 15/03/2005.
- [19] Calmon, J.L. et. al. **Reciclagem do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas**. In: Encontro Nacional Sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 1997, Canela – RS, 1997.
- [20] Freire, A.S.; Motta, J.F.M. **Potencialidades para o aproveitamento econômico de rejeito da serragem de granito**. *Rochas de Qualidade: Granitos, Mármore e Pedras Ornamentais*, 16 (123), p. 98-108, 1995.
- [21] Moura, W.A. et al. **Utilização do resíduo do corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso**. *Sitientibus*, (26), p 49-61, 2002.
- [22] Calmon, J.L et al. **Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas de assentamento**. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Salvador-BA, 1997.
- [23] Lima Filho, V. X. et. al. **Determinação de parâmetros para a racionalização de processamento de rochas graníticas por abrasão**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, São Paulo, 1999.
- [24] Boletim UFMG nº 1311 - 28.03.2001. Disponível em: <http://www.ufmg.br/proex/geresol/rejeitoardosia.html>. Acesso em 15/03/2006
- [25] Selmo, S.M.S. **Propriedades e especificações de argamassas industrializadas de múltiplo uso**. Disponível em: [publicacoes.pcc.usp.br/PDF/BT310.pdf](http://publicacoes.pcc.usp.br/PDF/BT310.pdf). Acesso em: 15/03/2006.
- [26] [pt.wikipedia.org/wiki/Revestimento](http://pt.wikipedia.org/wiki/Revestimento). Acesso em: 15/03/2006.

## Capítulo 3 – Objetivos

---

De acordo com o que foi exposto até o momento, os seguintes objetivos podem ser apontados:

### 3.1 – Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é testar as propriedades da argamassa produzida com o compósito escória/granito no estado fresco e no estado endurecido, visando sua utilização como argamassa de revestimento como emboço de parede.

### 3.2 – Objetivos específicos

- Levantar e descrever os processos de geração de escória cristalizada e geração de resíduo do corte de blocos de mármore e ardósia;
- Estudar o percentual de perda de massa dos compósitos escória/granito e escória/ardósia através da análise térmica e desta maneira, a estabilidade térmica dos compósitos;
- Avaliar a permeabilidade da argamassa produzida em diferentes idades, através de ensaios de absorção d'água;
- Levantar o valor da resistência à compressão axial da argamassa produzida com o compósito escória/granito;
- Identificar e quantificar o processo de fissuração da argamassa produzida com o compósito escória/granito quando aplicada em paredes e exposta a condições climáticas normais;
- Comparar as propriedades da argamassa produzida com compósito escória/granito com as da argamassa convencional.

## Capítulo 4 – Materiais e Métodos

---

### 4.1 - Considerações iniciais

A parte experimental do presente trabalho foi dividida em duas etapas. A investigação do comportamento térmico do compósito escória/granito e escória/ardósia para avaliar a possível utilização desses materiais através do estudo da instabilidade térmica dos mesmos. Já com os resultados do comportamento térmico avaliado, foi feita a análise da viabilidade da substituição da cal hidratada pelo compósito escória/granito na produção de argamassa cujo objetivo é contribuir para uma nova utilização do resíduo. Foram realizados ensaios no estado fresco e estado endurecido de uma argamassa produzida a partir da substituição da cal (usada em argamassa convencional) pelo compósito escória/granito. Os materiais e métodos utilizados neste trabalho, nas duas etapas, são detalhados a seguir.

### 4.2 – Preparação dos compósitos para análise térmica

A escória utilizada neste trabalho é proveniente da Fundação Vieira Ltda localizada no município de Cláudio-MG. O pó de corte de mármore é proveniente da Samambaia Serraria de Granitos Ltda, localizada em Itapecerica-MG e o pó de ardósia é proveniente da Concretudo Ltda, localizada em Cláudio-MG.

Primeiramente a escória bruta foi triturada em moinho de bola 7/12 durante 4 horas (Figura 4.1). Após a trituração, o pó de escória foi peneirado para se obter uma granulometria máxima de 0,2 mm. Os pós de granito e ardósia também foram peneirados semelhantemente à escória. A Figura 4.2 mostra o pó de escória obtido neste trabalho.



**Figura 4.1** - Moinho de bolas utilizado neste trabalho.



**Figura 4.2** - Pó de escória obtido neste trabalho.

Após o peneiramento dos pós, foram homogeneizadas amostras com cinco composições diferentes. As composições das cinco amostras são mostradas na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1** - Composições das amostras obtidas para análise térmica.

<i>Amostra</i>	<i>Escória</i> (% em massa)	<i>% Granito</i> (% em massa)	<i>% Ardósia</i> (% em massa)
1	50	0	50
2	50	50	0
3	10	90	0
4	20	80	0
5	30	70	0

Todas as amostras foram analisadas termicamente por análise termogravimétrica (TGA), usando-se um aparelho METTLER modelo TG 50. Utilizou-se uma taxa de aquecimento de 20 °C/min no intervalo de 25 °C a 800 °C em atmosfera oxidante. A Figura 4.3 mostra o equipamento TGA utilizado neste trabalho.



**Figura 4.3** - Equipamento TGA METTLER modelo TG 50.

### **4.3 – Preparação das argamassas**

Foram preparadas duas argamassas: uma argamassa convencional e a argamassa de estudo, a última contendo o compósito escória/granito (50% escória e 50% granito).

A argamassa convencional foi preparada fazendo a mistura em massa de cimento portland CII, cal hidratada e areia em betoneira de eixo inclinado com capacidade de 120 litros, utilizando a seguinte seqüência: areia, em seguida cimento e depois a pasta de cal. Foi adicionada água na mistura para se obter uma consistência ideal para aplicação, como requer a construção civil [1].



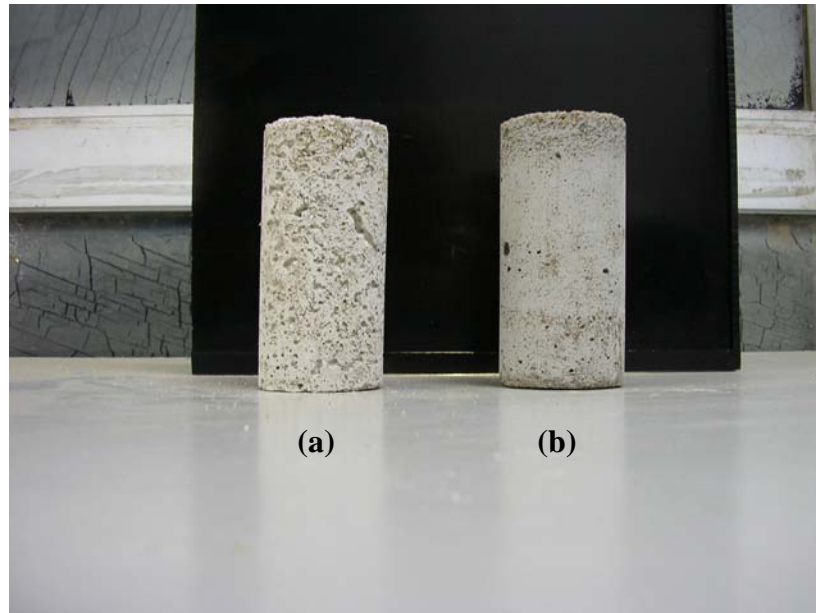
A argamassa em estudo foi preparada analogamente à argamassa convencional. Porém, a cal hidratada foi substituída pelo compósito escória/granito a fim de se obter uma utilidade para o objeto de estudo (escória).

A Tabela 4.2 mostra as proporções em volume dos materiais usados na preparação das argamassas.

**Tabela 4.2** - Composições (em volume) das argamassas obtidas neste trabalho.

<i>Argamassa</i>	<i>Cimento</i>	<i>Cal</i>	<i>Areia</i>	<i>Compósito</i>
Convencional	10	20	80	0
Escória/granito	10	0	80	20

Foram moldados 20 corpos de prova 50 x 100 mm de uma porção de cada argamassa, conforme procedimentos da norma NBR 7215 (ABNT,1996) [2], para ensaios de resistência à compressão, absorção de água e permeabilidade por capilaridade no estado endurecido. Os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas e mantidos no ambiente de laboratório até as idades de ensaio, 28, 60 e 90 dias. A Figura 4.4 mostra os corpos de prova confeccionados.



**Figura 4.4** - Corpos de prova confeccionados. Corpo de prova preparado com argamassa convencional (a) corpo de prova preparado com a argamassa de estudo (b).

#### **4.4 – Ensaio realizados**

##### **4.4.1 – Argamassas no estado fresco**

##### **4.4.1.1 – Trabalhabilidade**

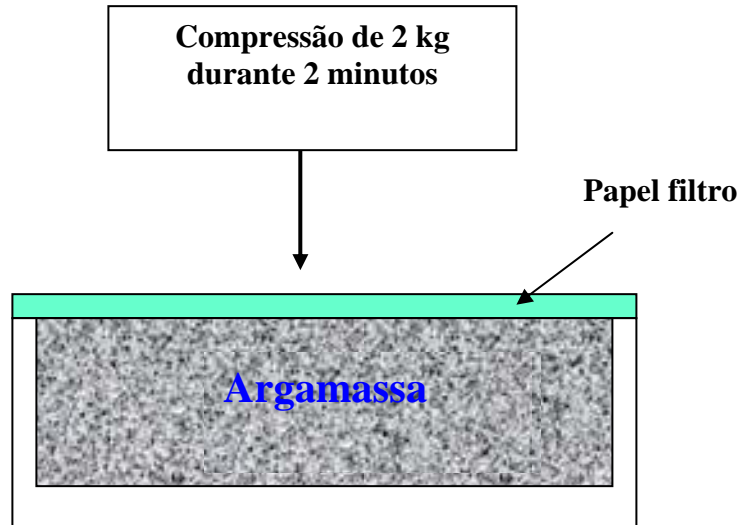
Esta propriedade relaciona-se principalmente à consistência. Em termos práticos, a trabalhabilidade significa facilidade de manuseio. Pode-se dizer que uma argamassa é trabalhável, de um modo geral, quando ela distribui-se facilmente ao ser assentada, não adere na ferramenta quando está sendo aplicada, não segrega ao ser transportada, não endurece em contato com superfícies absorvivas e permanece plástica por tempo suficiente para que a operação seja completada [3]. A trabalhabilidade das argamassas é uma característica complexa, resultante da união de diversas outras propriedades, tais como consistência, plasticidade, retenção de água, coesão, endurecimento sob sucção e

tixotropia (perda de viscosidade). Avaliar, quantificar e indicar valores de trabalhabilidade das argamassas por meio de ensaios é uma tarefa muito difícil, uma vez que ela depende não só das características intrínsecas da argamassa, mas também da destreza do pedreiro que está executando o serviço e de várias propriedades do substrato, além da técnica de aplicação [4]. Neste sentido, para avaliar a trabalhabilidade das argamassas aditivadas com compósitos, foi recomendado a um pedreiro experiente que utiliza-se os compósitos nas proporções anteriormente descritas para a produção de diversos tipos de argamassa. Após esse procedimento, o pedreiro deu um parecer sobre algumas características que serão descritas no capítulo seguinte referente a resultados e discussão.

#### **4.4.1.2 – Retenção de água**

A retenção de água das argamassas foi determinada conforme a norma NBR 13277 (ABNT, 1995) que prescreve procedimentos para determinar a retenção de água de argamassa para assentamento e revestimentos de paredes e tetos utilizando papel filtro [5]. Este ensaio permite avaliar a trabalhabilidade da argamassa, pois à medida que a mesma retém água, facilita sua aplicação e acabamento.

O princípio da determinação da retenção de água pela NBR 13277 é a quantificação da água absorvida em papel-filtro colocado sobre a argamassa fresca, sob uma dada pressão, comprimida por um peso assentado sobre o papel. Neste caso, a argamassa está confinada em um recipiente tendo como face exposta somente a superior onde a argamassa estará em contato com o papel-filtro, através do qual a água é perdida ou succionada, conforme ilustrada a Figura 4.5.



**Figura 4.5** - Método para determinação da retenção de água, segundo NBR 13277.

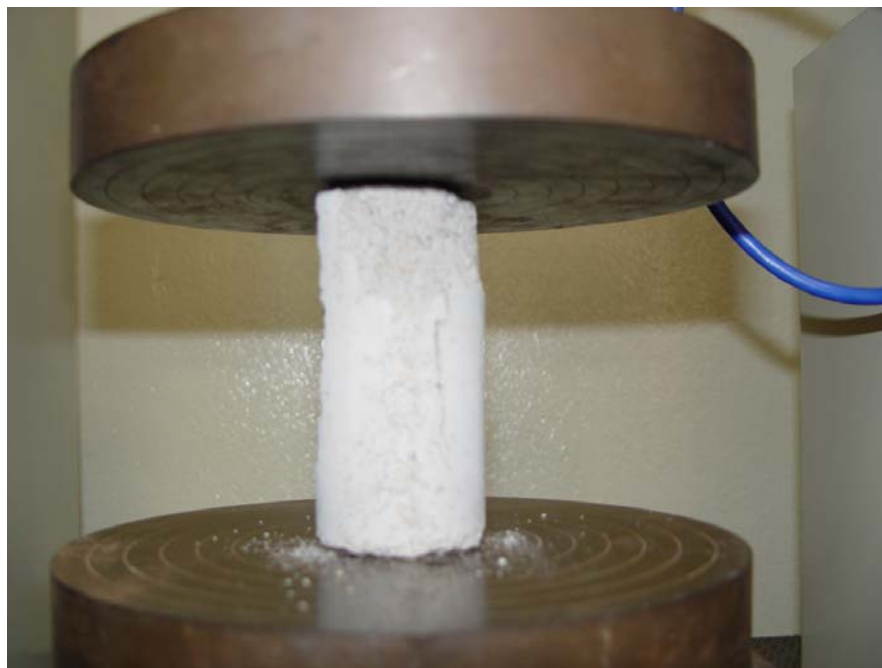
#### **4.4.2 – Argamassas no estado endurecido**

##### **4.4.2.1– Resistência à compressão**

A resistência à compressão foi determinada nas idades de 28, 60 e 98 dias, utilizando seis corpos (três para cada argamassa) de prova 50 x 100 mm para cada idade, em conformidade com a norma NBR 13279 (ABNT, 1995) [6], utilizando uma máquina universal de ensaios mecânicos informatizada (EMIC DL10000) (Figura 4.6), sendo a velocidade de ensaio de 1 mm/min. A Figura 4.7 mostra a execução do ensaio à compressão realizado neste trabalho.



**Figura 4.6** - Prensa de ensaios mecânicos utilizada neste trabalho.



**Figura 4.7** – Rompimento do corpo de prova no ensaio à compressão.

#### 4.4.2.2– Absorção de água por imersão

A absorção de água, por parte de uma argamassa permite avaliar a sua aplicabilidade em sistemas que requerem alta impermeabilidade, como piscinas, tanques e diques. A absorção por imersão  $A_i$  é calculada através da equação [7]:

$$A_i = \frac{M_{\text{sat}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{sec}}} \times 100, \quad (4.1)$$

sendo  $M_{\text{sat}}$  a massa do corpo de prova saturado,  $M_{\text{sec}}$  a massa do corpo de prova seco.

O ensaio para determinação da absorção de água por imersão foi realizado em 3 corpos de prova para cada argamassa, nas idades de ensaio de 28, 60 e 90 dias, utilizando a norma NBR 9778 (ABNT, 1987). A Figura 4.8 mostra os corpos de prova em ensaios de absorção de água por imersão.



**Figura 4.8** - Corpos de prova em ensaios de absorção de água por imersão.

#### 4.4.2.3– Absorção de água por capilaridade

O ensaio para determinar o coeficiente de capilaridade foi realizado em corpos de prova cilíndricos (50 x 100 mm), aos 28, 60 e 90 dias de idade, utilizando a norma NBR 9779 (ABNT, 1987). Segundo a norma, a absorção de água por capilaridade  $A_C$  é calculada através da equação [8]:

$$A_C = \frac{M_a - M}{S}, \quad (4.2)$$

sendo  $M_a$  a massa do corpo de prova imerso em água,  $M$  a massa do corpo de prova e  $S$  a área de secção transversal do corpo de prova.

O coeficiente de capilaridade é o coeficiente angular da reta ajustada, tomando-se no eixo das abscissas a raiz quadrada dos tempos de 10 minutos e 90 minutos e no eixo das ordenadas as absorções de água ( $A_C$ ) correspondentes a estes tempos.

### 4.4.3 – Revestimento

#### 4.4.3.1 – Avaliação de fissuração

A argamassa obtida pela substituição da cal pelo compósito escória/granito foi avaliada em termos de sua capacidade aglomerante quanto ao revestimento pela análise da fissuração. Após trinta dias da realização do chapisco, foram revestidos dois painéis (um com argamassa convencional e outro com a argamassa obtida com escória/granito). Todos os painéis foram revestidos pelo mesmo pedreiro, obedecendo à seguinte seqüência: lançamento da argamassa, após 5 minutos fez-se o sarrafeamento e esperou-se 12 minutos para execução do desempenho.

Foi contado o número de fissuras visíveis em cada painel revestido com argamassa. Utilizando-se um barbante, foi determinado o comprimento linear total das fissuras e dividido pela área do painel ( $1 \text{ m}^2$ ) [9].

#### **4.4.3.2 – Análise de imagens**

Para se utilizar uma argamassa para revestimento é recomendável que a porosidade externa seja mínima, no sentido de garantir uma superfície com acabamento de qualidade. Para visualizar a superfície externa foram utilizadas duas técnicas, a saber:

##### *Foto digital*

Para se obter a imagem dos poros foi feita uma foto com uma câmera digital (OLYMPUS 3.2 MPixels) o que nos permite ter uma noção aproximada do tamanho dos poros maiores, através de uma escala numérica adicionada a foto.

##### *Microscopia ótica*

A superfície externa também apresenta micro poros que não são visíveis a olho nu, para avaliar a quantidade de micro poros e possíveis fases formadas nas superfícies da amostras utilizou-se a técnica de microscopia ótica.

O microscópio ótico é um instrumento usado para ampliar, com uma série de lentes, estruturas pequenas impossíveis de se visualizar a olho nu. O microscópio apresenta dois sistemas de lentes convergentes; a objetiva e a ocular. A objetiva é um conjunto de lentes que apresenta pequena distância focal e que fornece uma imagem real e aumentada do objeto que é observado. A ocular, também formada por lentes convergentes, funciona como uma lupa, que nos dá uma imagem virtual e aumentada da



imagem real que se formou pela objetiva. A objetiva e a ocular são dispostas nas extremidades de um cilindro oco, constituindo a coluna do microscópio e que possui a capacidade de se aproximar ou afastar da amostra para que se tenha a focalização perfeita. Isto é realizado por intermédio de uma cremalheira que se acha associado a uma roda dentada. A resolução do microscópio é resultado do produto da ampliação linear da objetiva pela potência da ocular; seu valor será elevado quando as distâncias focais da objetiva e ocular forem pequenas. O poder separador, ou distância mínima distinguível entre dois pontos é limitado pela difração da luz. Assim, se o feixe de luz incidente tiver uma abertura angular grande e utilizarmos lentes de inversão, o poder separador será melhorado, pois se elimina difração das bordas da lente. Um microscópio em sua constituição simples é formado por três elementos: Um sistema óptico de ampliação; uma fonte de luz; e um estágio de visualização. A complexidade total do sistema é aumentada dramaticamente quando se tenta aumentar a capacidade de ampliação e a qualidade de imagem [10]. A Figura 4.9 mostra o microscópio óptico (modelo Genavert Zeiss).



**Figura 4.9** – Microscópio óptico utilizado neste trabalho.

#### **4.5 – Referências**

- [1] LUZ, J.A.M.; BALAREZO, F.J.M; PEREIRA, C.A. **Emprego de argamassa expansiva e termoconsolidação de peças em cantaria.** *Revista Escola de Minas*, **56** (3), p. 161-167, 2003.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Cimento portland – determinação da resistência à compressão. **NBR 7215.** Rio de Janeiro, 1996.
- [3] Sabbatini, F. H. **O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílicocalcária.** São Paulo, Universidade de São Paulo - Escola Politécnica, 1984. 298 p. (Dissertação Mestrado).
- [4] CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CARVALHO, A. **Controle de argamassa industrializadas em obra por meio do método de penetração do cone.** In:

- SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI., 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis:ANTAC, 2005. p. 83-94.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da retenção de água. **NBR 13277** Rio de Janeiro, 1995.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Argamassa para Assentamento em Paredes e Revestimentos de Paredes e Tetos - Determinação da Resistência Compressão - Método de Ensaio. **NBR 13279**: Rio de Janeiro, 1995.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. **NBR 9778**. Rio de Janeiro, 1987.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Argamassas e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por capilaridade. **NBR 9779**. Rio de Janeiro, 1995.
- [9] Da Silva, N.G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. Curitiba, Universidade Federal do Paraná – Departamento de Construção Civil, 2006 (Dissertação de Mestrado).
- [10] [http://wikipedia.org/wiki/Microscópio\\_óptico](http://wikipedia.org/wiki/Microscópio_óptico). Acesso em 22/04/2006.

## Capítulo 5 – Resultados e discussões

---

### 5.1 - Considerações iniciais

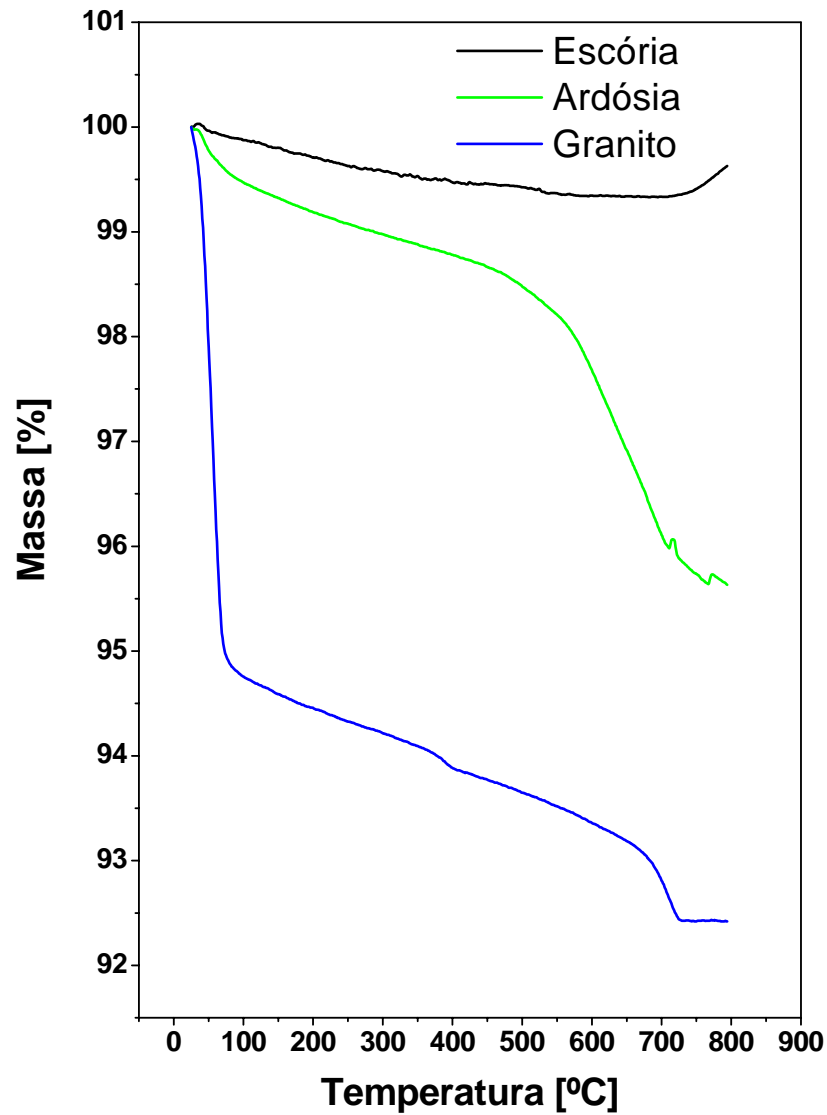
Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através do método experimental anteriormente descrito, em uma primeira etapa serão apresentados os gráficos, onde se avalia o percentual da variação da massa das amostras em função do tempo, obtidos através da análise termogravimétrica (TGA), para vislumbrar sua possível utilização na produção de materiais destinados à indústria da construção civil. Na segunda etapa serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios mecânicos no estado fresco e estado endurecido para comparar as características de uma argamassa produzida com materiais convencionais com uma argamassa produzida utilizando o compósito escória/granito em substituição à cal hidratada.

### 5.2 - Análise termogravimétrica das amostras

A análise termogravimétrica é a técnica que analisa a variação da massa de uma amostra em função da temperatura ou do tempo. Portanto a verificação da estabilidade térmica de um material se torna importante, pois um ganho de massa pode em alguns casos representar um aumento do volume do corpo. A instabilidade volumétrica é um fator importante quando se avalia a possível utilização de um novo material na construção civil [1]. Uma argamassa na parede de uma churrasqueira, por exemplo, poderá se dilatar vindo a provocar rachaduras na parede. A seguir são mostrados os gráficos obtidos na análise térmica das amostras.

Na Figura 5.1 tem-se uma comparação do percentual de perda de massa da escória, granito e ardósia em função da temperatura. Verifica-se, pela Figura 5.1 que a escória é muito estável termicamente, e que o granito, após perder a água livre,

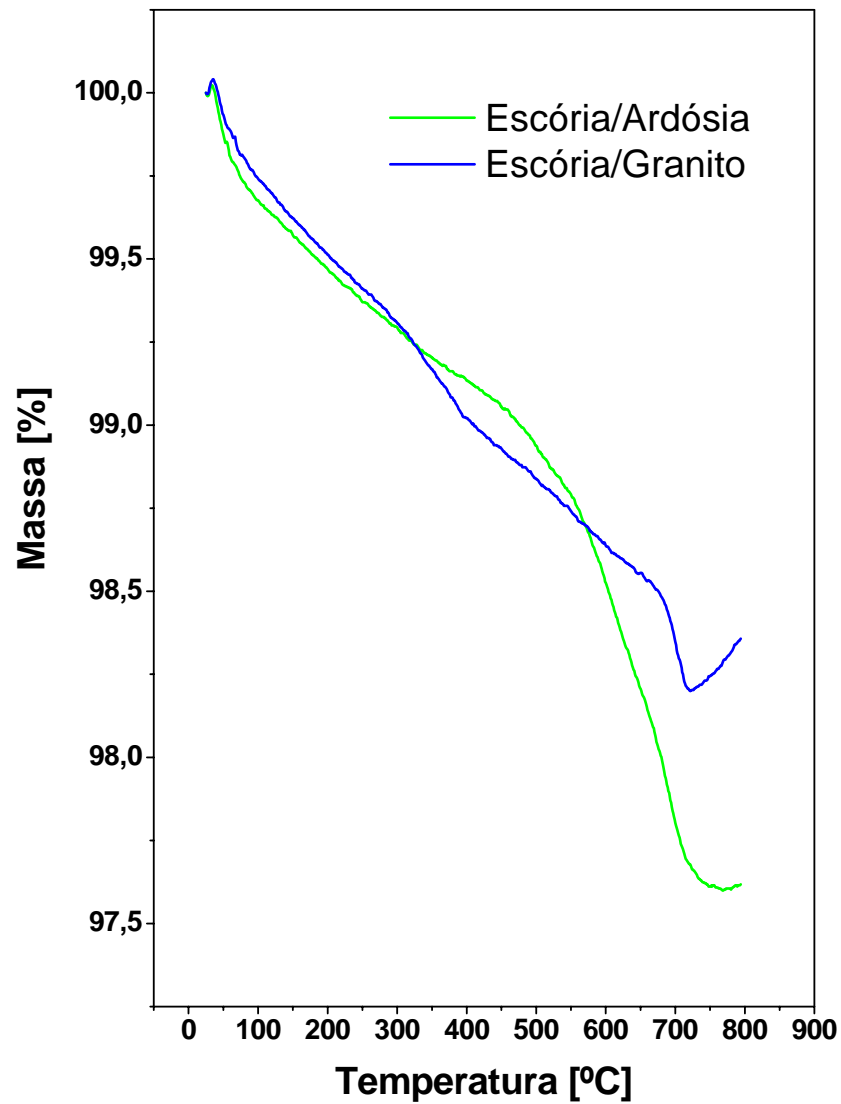
também se comporta de forma parecida. Isso se deve ao fato de que os óxidos que constituem a escória e o granito possuem alto ponto de fusão.



**Figura 5.1** – Análise termogravimétrica da escória, granito e ardósia.

A Figura 5.2 mostra o percentual de perda de massa dos compósitos escória/granito e escória/ardósia. Como era esperado, o compósito escória/granito

teve uma perda menos acentuada de massa a partir de 600°C que o compósito escória/ardósia. A presença de granito parece antecipar a oxidação do óxido de ferro presente na escória, cuja composição percentual pode ser vista na Tabela 5.1.



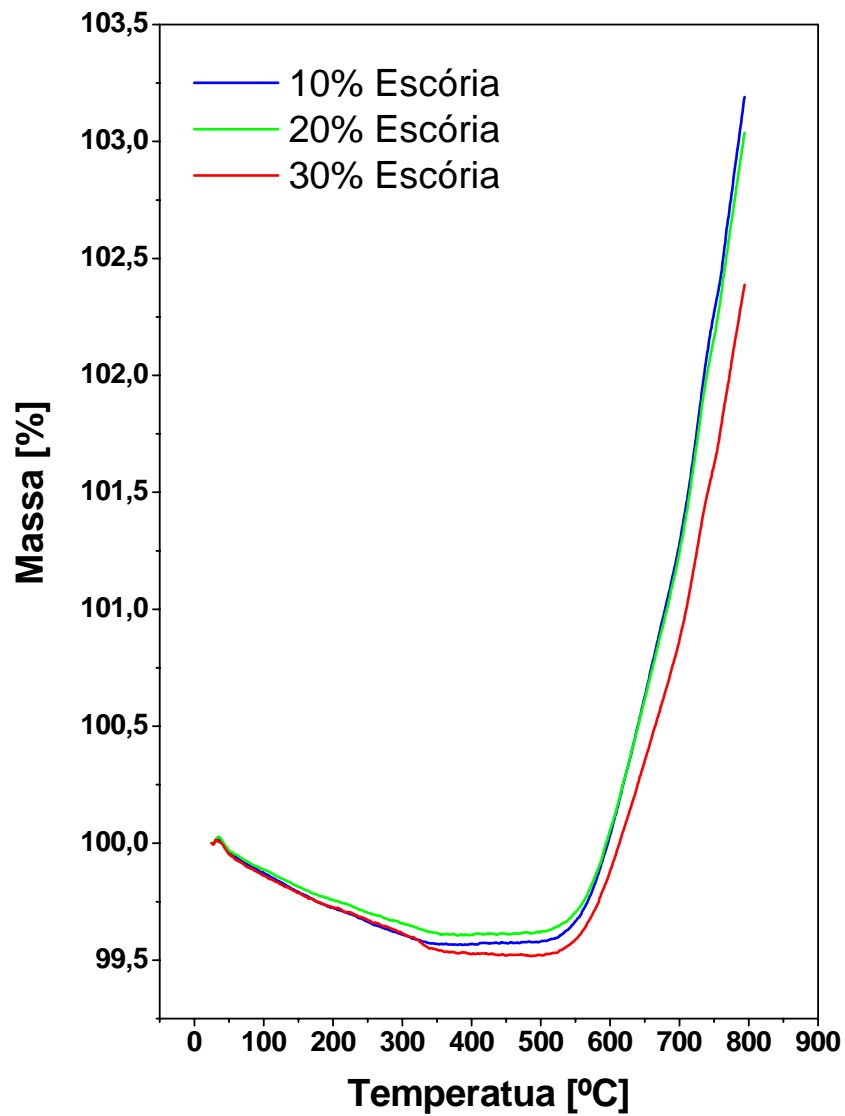
**Figura 5.1** – Análise termogravimétrica dos compostos escória/granito e escória/ardósia.

**Tabela 5.1** - Composição química percentual da escória. Dados fornecidos pela Fundação Vieira LTDA.

<i>Óxidos</i>	<i>Porcentagem (%)</i>
SiO <sub>2</sub>	40 - 50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10 - 18
CaO	20 - 35
MgO	1 - 5
FeO	1 - 8
MnO	1 - 5

A Figura 5.3 mostra o aumento percentual de massa em função da concentração de granito no compósito. A Figura 5.3 mostra que com o aumento da concentração de granito, a oxidação do óxido de ferro presente na escória diminui de forma gradativa em função da temperatura.

A utilização da escória na produção de tijolos se mostra uma alternativa interessante do ponto de vista comercial segundo alguns autores [2,3]. Porém, pela avaliação das análises termogravimétricas, verifica-se de imediato, que a escória cristalizada não pode ser utilizada na produção de tijolos, pois, um aumento de massa com a temperatura pode gerar fraturas internas em tijolos, uma vez que os mesmos são secos em fornos a altas temperaturas, em torno de 900 °C [4].



**Figura 5.3** – Análise termogravimétrica do compósito de escória/granito para várias concentrações de escória.

### 5.3 – Estudo da trabalhabilidade

A trabalhabilidade é uma propriedade da argamassa muito complexa, pois envolve uma série de fatores, como já comentado no capítulo anterior. Além dessa dificuldade há autores que questionam as normas atuais sobre a medida de várias propriedades da argamassa [5]. Diante da dificuldade de se obter dados técnicos



sobre a trabalhabilidade da argamassa, este trabalho se norteou pelos procedimentos de um pedreiro com larga experiência na execução de revestimentos de paredes. De acordo com o pedreiro, a argamassa contendo o compósito escória/ardósia não apresentou boa trabalhabilidade, não aderindo bem ao chapisco e secando muito rápido na parede. Com relação à variação da quantidade de escória no compósito para a produção de argamassa as mesmas não apresentaram mudanças significativas. Uma vez que o compósito com grande proporção de granito pode oxidar, como evidenciado na análise térmica, se tornou viável apenas a utilização do compósito contendo valores intermediários, ou seja, 50% de escória e 50% de granito.

#### **5.4 – Retenção de água**

Uma característica importante da argamassa é a sua retenção de água, essa condição representa a capacidade que a argamassa possui de reter a água de amassamento contra a sucção da base ou contra a evaporação. Essa qualidade permite a adequada hidratação do cimento, o endurecimento da argamassa de forma gradativa, garantindo o desempenho esperado no revestimento ou no assentamento [6].

Uma argamassa retém espontaneamente a água usada no amassamento, molhando a superfície dos grãos de areia e do aglomerante e preenchendo os vazios; a água em excesso pode sair da argamassa por exsudação, evaporação ou sucção da base [7]. O aumento da retenção de água da argamassa pode ser conseguido com aumento da superfície específica dos constituintes ou com aditivos que, por suas características, adsorvem a água ou impedem sua percolação através da massa sólida. O percentual de água retida na argamassa aditivada com o compósito escória/granito foi de 88%, já a argamassa convencional reteve 91% da água adicionada na mistura.

Observa-se que todos os valores de retenção de água obtidos nas argamassas estão acima de 80%, valor este que as classifica como argamassas de boa retenção de água [8]. Cabe destacar que a substituição da cal pelo resíduo não afetou de maneira significativa o poder de retenção de água das mesmas. De acordo com a norma NBR 13277 [8] a argamassa produzida com o resíduo escória/granito pode ser classificada como normal.

### 5.5 - Análise da resistência à compressão

O ensaio para determinar a resistência à compressão foi realizado em corpos de prova 50 x 100 mm nas idades de 28, 60 e 90 dias, conforme a NBR 13279 (ABNT, 1995) [9]. Os resultados médios para cada tipo argamassa estão apresentados na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2** - Resultados médios do limite resistência à compressão axial (MPa).

<i>Corpo de prova</i>	<i>28 (dias)</i>	<i>60 (dias)</i>	<i>90 (dias)</i>
Convencional	1,80 ± 0,05	1,75 ± 0,04	1,83 ± 0,09
Escória/Granito	1,38 ± 0,02	1,35 ± 0,05	1,49 ± 0,07

Analisando os resultados da Tabela 5.2, constata-se que à adição do compósito escória/granito diminui a resistência em todas as idades quando se compara com a argamassa convencional. Tal fato é coerente com o comportamento da escória, pois esta não possui poder aglomerante, fator que interfere diretamente na resistência de um material. De acordo com Jonh [10] o módulo de hidraulicidade é a relação entre elementos modificadores de cadeia e formadores de cadeia, no qual o

módulo mais elementar é o que relaciona a quantidade de CaO e SiO<sub>2</sub>. No caso da escória ácida que foi objeto de estudo sua hidraulicidade é baixa, o que a torna pouco aglomerante.

Analisando a norma NBR 13281(1995) [11] (Tabela 5.3) que avalia as exigências físicas e mecânicas para argamassas industrializadas, especificadas para assentamento de paredes e revestimentos de tetos e paredes, observa-se que todas as argamassas produzidas neste trabalho, atendem aos limites de  $\geq 0,1$  e  $< 4$  MPa, o que as classifica como do Tipo I.

**Tabela 5.3** - Resistência à compressão (MPa) de acordo com a norma NBR 13281.

<i>Limites</i>	<i>Tipos de argamassa</i>
$\geq 0,1$ e $< 4$	I
$\geq 4$ e $\leq 8$	II
$\geq 8$	III

## 5.6 - Estudo da absorção de água

### 5.6.1 - Absorção de água por imersão

A absorção por imersão é uma característica importante da argamassa, principalmente quando a argamassa for usada em revestimento para piscinas, caixas d'água, diques e outras aplicações onde o contato com a água é constante. Absorção de água por imersão é a medida do percentual de água absorvido até a saturação quando o corpo de prova fica imerso em água.

Para os resultados de absorção por imersão, apresentados na Tabela 5.4, observa-se que na argamassa contendo o compósito a absorção foi menor em todas as idades de ensaio. Este comportamento pode ser explicado através da presença do

resíduo muito fino, que está exercendo, provavelmente, a função de “filler” (material granular que passa por uma peneira de 0,15 mm), comaltando os vazios da matriz da argamassa [12].

**Tabela 5.4** – Percentual da absorção de água por imersão.

<i>Corpo de prova</i>	<i>28 (dias)</i>	<i>60 (dias)</i>	<i>90 (dias)</i>
Convencional	18,75 ± 0,25	18,31 ± 0,18	18,27 ± 0,31
Escória/Granito	10,95 ± 0,54	11,05 ± 0,24	10,98 ± 0,32

### 5.6.2 - Absorção de água por capilaridade

Os revestimentos de argamassa têm como função primordial numa edificação, entre outras, a impermeabilidade à água, principalmente se for externo. Um dos fenômenos que influenciam nessa característica é denominado absorção por capilaridade. Este fenômeno pode ser compreendido através da movimentação da água tanto no estado líquido como no estado de vapor através da camada de argamassa endurecida. É influenciada pelos poros capilares de dimensões maiores que 50 nm, e pelas bolhas de ar incorporado, que podem chegar a até 3 mm [13]. Como os capilares são os espaços ainda não preenchidos pelos compostos hidratados do aglomerante, a permeabilidade depende do prosseguimento da hidratação ao longo do tempo, ou seja, com o avanço da idade da argamassa aplicada, maior será o grau de endurecimento, e mais baixa a sua permeabilidade.

A existência de poros interligados ou não, bem como de diferentes diâmetros, faz que alguns contribuam para a permeabilidade e outros, não. Se a porosidade for elevada e os poros estiverem interligados, eles contribuem para o deslocamento de

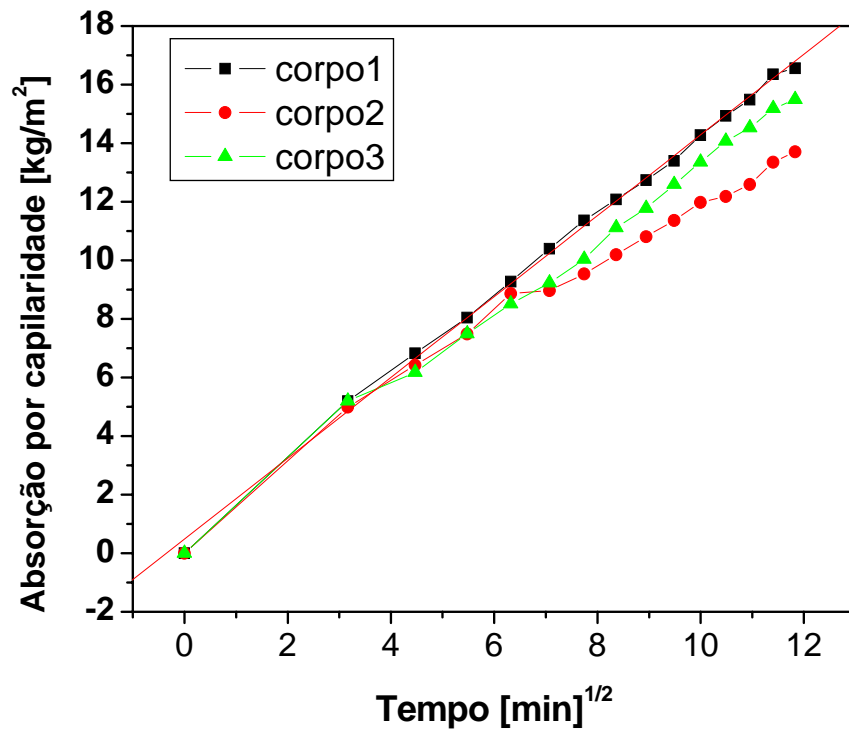
fluidos, de modo que a permeabilidade também pode ser alta. Por outro lado, se os poros forem descontínuos ou, de outro modo, ineficazes para o deslocamento de fluidos, a permeabilidade será baixa, mesmo com porosidade alta. Esta propriedade é avaliada pelo coeficiente de permeabilidade por capilaridade. A movimentação da água através dos capilares é determinada pela tensão superficial da água e a altura da penetração está relacionada aos capilares [14] segundo a Lei de Jurin, apresentada pela Equação 5.1:

$$h = \frac{2v\cos\theta}{ryg} \quad (5.1)$$

Onde h representa altura da penetração da água no capilar, v a tensão superficial da água,  $\theta$  o ângulo de contato, r o raio dos capilares,  $\gamma$  a massa específica da água e g a aceleração da gravidade.

A altura da penetração da água é inversamente proporcional ao raio dos capilares, conforme mostra a equação 5.1, ou seja, quanto menor o raio dos capilares, maior será a altura que a água atingirá no corpo de prova.

Como já descrito no capítulo 3, a inclinação da reta no gráfico da Absorção por capilaridade x (tempo de absorção)<sup>1/2</sup>, exprime os coeficientes de capilaridade dos corpos de provas estudados. A Figura 5.4 mostra um dos gráficos obtidos para a argamassa produzida com escória/granito.



**Figura 5.4** – Gráfico de Absorção por capilaridade x (tempo de absorção)<sup>1/2</sup> para a argamassa produzida com escória/granito com 28 dias.

Observando os resultados das argamassas em estudo, provavelmente a diminuição do raio dos capilares seja devido ao aumento do teor de material fino. Fator que comprova a maior altura atingida pela água e o baixo valor do coeficiente de capilaridade encontrado para argamassa contendo o compósito escória/granito. Os resultados do ensaio de absorção por capilaridade são mostrados na Tabela 5.5. A Tabela 5.6 apresenta a classificação das argamassas para o requisito coeficiente de capilaridade segundo a NBR 13281(2005) [11]. A argamassa produzida com o resíduo escória/granito pode ser classificada como classe C1. Ou seja, a argamassa apresenta melhor permeabilidade que a argamassa convencional.

**Tabela 5.5** – Coeficientes de absorção por capilaridade Coeficiente de capilaridade [(kg/m<sup>2</sup>)/min<sup>1/2</sup>].

<i>Corpo de prova</i>	<i>28 (dias)</i>	<i>60 (dias)</i>	<i>90 (dias)</i>
Convencional	1,80 ± 0,05	1,75 ± 0,04	1,83 ± 0,09
Escória/Granito	1,38 ± 0,02	1,35 ± 0,05	1,49 ± 0,07

**Tabela 5.6** - Classificação dos coeficientes de capilaridade segundo NBR 13281 (ABNT, 2005).

<i>Classe</i>	<i>Coeficiente de capilaridade (kg/m<sup>2</sup>/min<sup>1/2</sup>)</i>
C1	< 1,5
C2	1,0 a 2,5
C3	2,0 a 4,0
C4	3,0 a 7,0
C5	5,0 a 12,0
C6	> 10,0

## 5.7 – Estudo do revestimento

### 5.7.1 - Avaliação de fissuração

Um dos problemas mais comuns em paredes revestidas com argamassa são as fissuras e rachaduras. Esse comportamento se deve ao fato de que o revestimento não consegue resistir a deformações próprias e da base sem se romper [15]. Uma das causas desse rompimento é a variação das condições climáticas, principalmente em países de clima tropical como o Brasil. Dentre as funções de uma argamassa de

revestimento, a capacidade de absorver eventuais movimentações e acomodações da alvenaria destaca-se como umas das mais importantes. Esse comportamento é requerido para que o revestimento contribua para a qualidade do envelope da edificação.

Alguns autores como Maciel et. al. [16] afirmam que a argamassa para revestimento só tem a responsabilidade de absorver as deformações de pequena amplitude que ocorrem em função da ação da umidade ou da temperatura e não as de grande amplitude, provenientes de outros fatores, como deformações estruturais. No entanto, faltam dados sobre esforços gerados pela movimentação de estruturas de grande altura atuantes no revestimento. A capacidade de absorver deformações está relacionada ao módulo de deformação da argamassa: quanto menor o módulo de deformação (menor teor de cimento), maior a capacidade de absorver deformações. Uma vez compreendida sua importância, existe uma preocupação atual muito grande do meio técnico em se determinar esta propriedade. Muitas pesquisas quanto aos procedimentos de ensaio foram tentados, mas ainda não se chegou a um consenso. Nem se tem valores determinados por um ou outro método de ensaio que permitam uma classificação geral. Faz-se necessário ainda um estudo detalhado, levando em conta as variáveis intervenientes nesse resultado.

Neste contexto, este trabalho utilizou uma técnica descrita por Narciso [17] com o objetivo de medir as fissuras visíveis e avaliar qual argamassa resistiu melhor às deformações da parede. As Figuras 5.5 e 5.6 mostram os painéis revestidos com as argamassas produzidas. Na Tabela 5.7 são apresentados os resultados da contagem e medida do comprimento linear total (em cm) por área (em m<sup>2</sup>) das fissuras visíveis nos revestimentos de argamassas produzidas na idade de 80 dias.



Os resultados da Tabela 5.7 mostram que na argamassa contendo o compósito escória/granito o número de fissuras é menor. Tal resultado se deve a adição da escória cristalizada na mistura do compósito, pois a escória possui boa maleabilidade em função da sua alta estabilidade mecânica e boa fluência.



**Figura 5.5** – Painel revestido com argamassa convencional.



**Figura 5.6** – Painel revestido com argamassa produzida com escória/granito.

**Tabela 5.7** - Resultados da contagem e medida do comprimento linear total (em cm) por área (em m<sup>2</sup>) das fissuras visíveis nos revestimentos de argamassas.

<i>Argamassa</i>	<i>Quantidade</i>	<i>cm/m<sup>2</sup></i>
Convencional	35	358,2
Escória/granito	25	256,4

### 5.7.2 - Análise de imagens

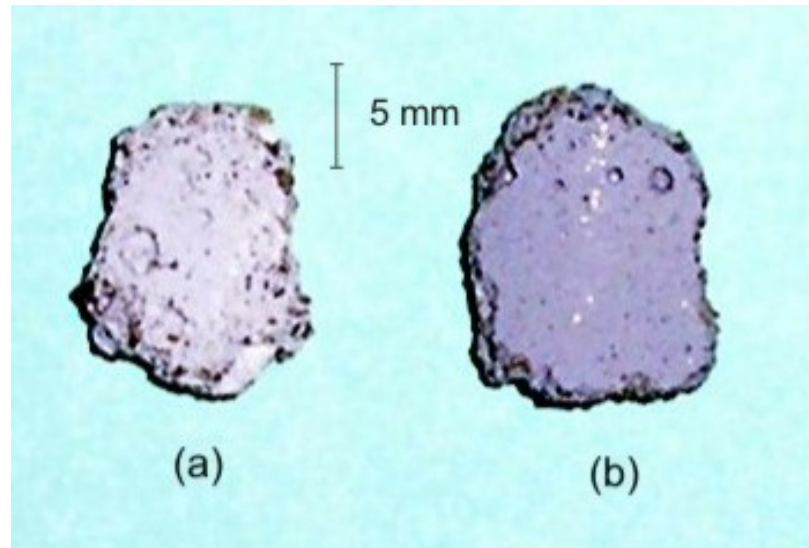
Nas propriedades dos materiais de construção há uma relação de dependência entre o processo de fabricação, sua microestrutura e suas propriedades. Dessa forma, a análise de imagens vem contribuir para aperfeiçoar o nível de conhecimento destes materiais, sendo um instrumento adequado para avaliar as mudanças morfológicas que ocorrem durante o seu processamento e seu uso.

A análise de imagens exerce um papel importante, principalmente na argamassa, pois com ela é possível se relacionar, de alguma forma, a microestrutura com suas propriedades físicas e mecânicas [18]. Algumas informações como, a avaliação das dimensões dos grãos das fases do concreto, dispersão e orientação das fases presentes, análise da superfície em 3D, características morfológicas da zona de transição e a micro fissuração podem ser obtidos através da análise das imagens.

O presente trabalho obteve imagens através de duas técnicas com o objetivo de identificar fissuras e micro fissuras, além de observar se fases dispersas em evidência na amostra.

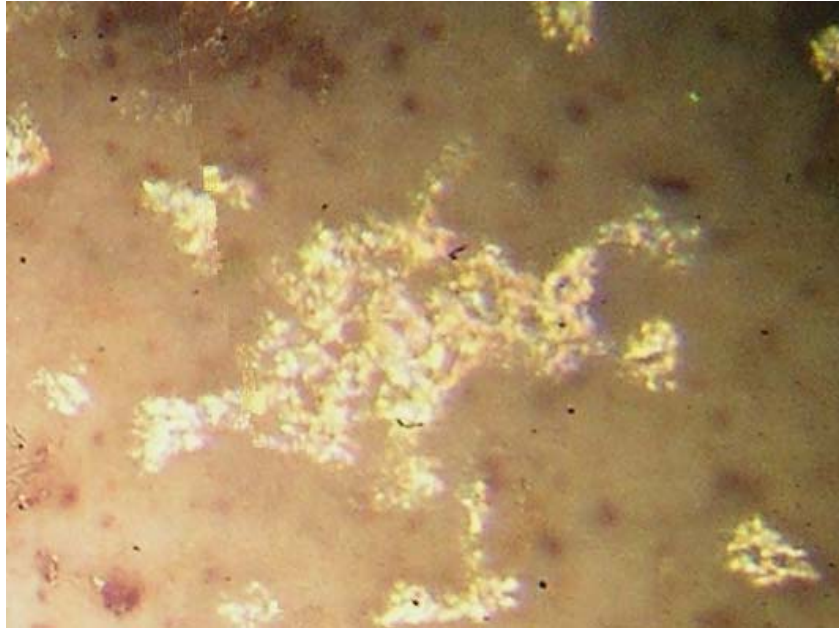
A Figura 5.7 apresenta as fotografias das amostras, onde pode ser visto que não há fissuras, porém é visível que o tamanho médio dos poros é menor na amostra que contém o resíduo escória/granito. Esse tamanho menor dos poros evidencia os

resultados encontrados no item que se refere à absorção por imersão, reafirmando que o pó de escória por ser um material pulveroso preenche os vazios na argamassa.



**Figura 5.7** - Amostras usadas para análise de imagem em microscopia óptica. Argamassa convencional (a) e argamassa produzida com escória/granito.

As imagens obtidas no microscópio ótico são mostradas nas Figuras 5.8 e 5.9. As imagens evidenciam que a quantidade aparente de micro poros é semelhante em ambas as amostras. Observa-se na Figura 5.8 a presença de uma fase isolada de areia, provavelmente essa segregação aparente é devido à presença da cal. Na Figura 5.9 observa-se que tal fase não existe. Esse comportamento parece estar relacionado ao fato de não haver segregação de areia na presença do composto escória/granito.



**Figura 5.8** – Microscopia óptica da amostra de argamassa convencional. Aumento 50 vezes.



**Figura 5.9** – Microscopia óptica da amostra de argamassa produzida com escória/granito. Aumento 50 vezes.

## 5.8 – Referências

- [1] Mancio, M. *Contribuição ao estudo do fenômeno da Instabilidade Volumétrica das Escórias de Aciaria elétrica*. Rio Grande do Sul, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Escola de Engenharia, 2001 (Dissertação de Mestrado).
- [2] Mostafa, N.Y.; El-Hemaly, S.A.S.; Al-Wakeel, E.I.; El-Korashy, S.A.; Brown, P.W. **Characterization and evaluation of the hydraulic activity of water-cooled slag and air-cooled slag**, *Cement and Concrete Research*, **31**, p. 899-904, 2001.
- [3] Mostafa, N.Y.; El-Hemaly, S.A.S.; Al-Wakeel, E.I.; El-Korashy, S.A.; Brown, P.W. **Hydraulic activity of water-cooled slag and air-cooled slag at different temperatures**, *Cement and Concrete Research*, **31**, p. 475-484, 2001.
- [4] C. M. F. Vieira, S. N. Monteiro. **Cerâmica Argilosa Incorporada com Resíduo Oleoso Proveniente do Setor Petrolífero** Revista Matéria, v. 11, n. 3, pp. 217 – 222, 2006. Disponível em: [www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo1080](http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo1080).
- [5] Nakakura E. H. ; Cincotto M. A. **Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento** São Paulo – 2004 ISSN 0103-9830 BT/PCC/359.
- [7] Bastos, P. K. X. **Retração e Desenvolvimento de Propriedades Mecânicas de Argamassas Mistas de Revestimento** - Tese de Doutorado - ESCOLA POLITÉCNICA, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - São Paulo - 2001.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água. **NBR 13 277**. Rio de Janeiro. 1995.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-Argamassa para Assentamento em Paredes e Revestimentos de Paredes e Tetos - Determinação

- da Resistência Compressão - **NBR 13279**. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1995.
- [10] John, V.M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. 1995. 189p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. NBR 13 281. Rio de Janeiro, 1995.
- [12] Calmon, J.L. (1); Tristão, F. A. (2); Lordêllo, F. S. S. (3); Da Silva, S. A. C. (4); Mattos, F. V. (5) **Reciclagem de resíduo de granito para a produção de argamassa**. Universidade Federal do Espírito Santo - Centro Tecnológico Canela, RS, 18 a 21 de novembro de 1997.
- [13] Muller, M. S. K.; Bucher, H. R. E. **Argamassas Industrializadas para Revestimento de Superfície e Assentamento de Alvenaria**, In ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADA - USOS E DESEMPENHO, São Paulo, SP 1993, **Anais**.
- [14] Levy, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. São Paulo, 2001. 194 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- [15] Cascudo, O.; Carasek, H.; Carvalho, A. **Controle de argamassas industrializadas em obra por meio do método de penetração do cone**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI., 2005, Florianópolis. **Anais** Florianópolis:ANTAC, 2005. p. 83-94.
- [16] MACIEL, L. L.; BARROS, M. M. S. B.; SABBATINI, F. H. **Recomendações para a Execução de Revestimentos de Argamassa para Paredes de**

**Vedação Internas e Externas e Tetos.** Projeto EPUSP/SENAI, São Paulo, 1998.

[17] Da Silva, N.G. *Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária*. Curitiba, Universidade Federal do Paraná – Departamento de Construção Civil, 2006 (Dissertação de Mestrado).

[18] Epaminondas L. F. J. e Camarini G. **Análise de imagens: Um avanço para a tecnologia do concreto**. In: 44º Congresso Brasileiro do Concreto, Belo Horizonte – MG, 2002.

## Capítulo 6 - Conclusões

---

O aproveitamento de resíduos sólidos é importante sobre vários aspectos, principalmente, aspectos ambientais e econômicos. Quando um resíduo é utilizado de forma eficiente, um problema é transformado em solução, uma vez que qualquer valor agregado representa ganho para uma empresa. Sobre esta ótica, foi produzida neste trabalho uma argamassa a partir dos resíduos escória e granito com propriedades adequadas, ou seja, que atendem às normas exigidas.

Os resultados das análises experimentais permitem concluir que:

- 1- A maior concentração de granito antecipa a oxidação do óxido de ferro presente na escória;
- 2- O compósito escória/ardósia mostrou-se menos instável termicamente;
- 3- O compósito escória/granito possui melhores características para a utilização na produção de argamassas;
- 4- A composição que apresentou melhores resultados foi a de 50% de granito e 50% de escória;
- 5- A argamassa produzida com o resíduo apresenta menor número de poros interligados;
- 6- A escória está funcionando como um enchimento, diminuindo os poros existentes na argamassa.
- 7- Verificou-se que devido ao menor número de poros na argamassa com resíduo houve uma diminuição do percentual de água absorvido.
- 8- A presença da escória diminuiu a resistência à compressão nos corpos de prova de argamassa;
- 9- A argamassa produzida pode ser considerada do tipo I.



## Capítulo 7 – Perspectivas futuras

---

A questão ambiental vem despertando a atenção de diversas áreas da sociedade. Devido ao desenfreado processo de urbanização pelo qual passa nossa sociedade, a quantidade de resíduos sólidos (ou não) gerados por uma indústria se torna um grande problema. O aproveitamento desses resíduos de forma produtiva é uma possibilidade de minimizar os problemas ambientais causados. Neste sentido, espera-se que o presente trabalho possa ter despertado o interesse sobre tal questão.

Algumas etapas, não menos relevantes das que aqui foram apresentadas, carecem de ser tratadas cuidadosamente. Essas etapas, se não foram incluídas no presente trabalho, deveriam ser objeto de estudo de futuros pesquisadores. Dessa forma, pode-se salientar que as perspectivas futuras desse trabalho são:

- 1- Realizar outros ensaios, como limite de resistência à flexão e aderência;
- 2- Estudar o compósito escória/granito como aditivo em outros materiais;
- 3- Aperfeiçoar o processo de moagem da escória;
- 4- Estudar a viabilidade econômica do presente trabalho como fonte de renda extra em uma indústria de fundição.